

Санкт-Петербургский государственный университет

***ЧАРИНЦЕВ Кирилл Алексеевич***

**Выпускная квалификационная работа бакалавра**

***Оценка эффективности разновысотной магнитной съемки с  
использованием БПЛА***

Уровень образования: бакалавриат

Направление: 05.03.01 Геология

Основная образовательная программа: «Геофизика и геохимия»

СВ.5091.2015

Профиль: «02 Геофизика»

Научный руководитель:

к.г.-м.н., доц. А. В. Тарасов

Рецензент:

А. А. Лихачев

ведущий геофизик, Федеральное государственное бюджетное  
учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический  
институт им. А.П.Карпинского»

Санкт-Петербург

2019

Saint-Petersburg State University

*Charintsev Kirill*

**Graduation work**

**Efficiency evaluation of magnetic survey made by UAV at different heights**

The level of education: bachelor  
Geophysics and Geochemistry

Scientific supervisor:

Andrey Tarasov

Reviewer:

A. A. Лихачев

Leading Geophysicist,

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI)

Saint Petersburg

2019

## **Аннотация**

В работе дается теоретическое описание магнитной съемки с беспилотных летательных аппаратов, приводятся примеры эффективного применения БПЛА в аэрогеофизике, описано положение БПЛА на рынке геофизических услуг, сделан общий обзор методики такого типа съемочных работ. Рассматривается методика совместной обработки данных смоделированной магнитной съемки, произведенной на нескольких предполагаемых полетных высотах. Обсуждаются недостатки и преимущества от использования предложенной методики обработки.

## **Annotation**

The paper gives a theoretical description of magnetic mapping from unmanned aerial vehicles, gives examples of the effective use of UAVs in airborne geophysics, describes the position of the UAV in the market of geophysical services, and shows a general overview of the methodology of this type of survey work. A method for joint processing of data from a simulated magnetic survey taken at several estimated flight altitudes is considered. The disadvantages and advantages of using the proposed processing technique are discussed.

## ***Оглавление***

Оглавление.....	4
Введение.....	6
Глава 1. Литературный обзор .....	8
1.1 Методика полевых работ с использованием БПЛА. Особенности методики маловысотных съемок .....	8
1.2 Беспилотные комплексы в промышленности .....	10
1.3 Беспилотные аэромагнитные комплексы .....	13
1.4 Примеры успешного применения магнитной съемки с БПЛА ....	14
1.4.1 Аэрогеофизические исследования Центрального Метаосадочного пояса Канады .....	14
1.4.2 Аэрогеофизические исследования в Бодайбинском районе Иркутской области .....	18
Глава 2. Моделирование разновысотной магнитной съемки .....	21
2.1 Теоретические особенности инверсии многовысотных данных .	22
2.2 Модель №1 .....	24
2.3 Модель №2.....	27
Глава 3. Результаты инверсии .....	30
3.1 Инверсия данных для модели №1 .....	30
3.2 Инверсия данных для модели №2 .....	33
Глава 4. Анализ результатов и решение вопроса об эффективности методики.....	34
Заключение .....	35
Список литературы .....	36

Приложение А. Информация об использованных программных средствах .....	38
а. MAG3D .....	38
б. Potent.....	41
в. MeshTools.....	42
г. ConvInv3D .....	42
Приложение Б. Дополнительные изображения .....	43

## ***Введение***

**Актуальность темы.** В последнее время в магниторазведке наблюдается устойчивая тенденция к замене традиционной наземной магнитной съемки съемкой с применением беспилотных летательных аппаратов. Глубокое и повсеместное внедрение беспилотников объясняется в первую очередь экономическими выгодами: скорость геофизических изысканий увеличивается многократно. Кроме того, магнитометр, прикрепленный к летательному аппарату, не встречает препятствий, расположенных на поверхности земли, и, таким образом, практически не оставляет пустых пятен на карте, а малая высота съемки гарантирует достаточную детальность (сравнимую с наземной съемкой).

С 2011г. регулярно публикуются статьи о перспективах применения беспилотных летательных аппаратов в магниторазведке. Авторами конструируются оригинальные модели БПЛА, магнитометров, реализуется программное обеспечение, создающее полетные миссии. И интерес к БПЛА у геофизиков, очевидно, будет только возрастать.

Аэромагнитные съемки с беспилотников уже занимают свой ценовой сегмент благодаря производительности, качеству и скорости (рис. 1).

Так как скорость измерений высока, и они выполняются в автоматическом режиме, возможно, имеет экономический смысл проведение дополнительных полетов на всё возрастающих высотах. Если результат решения обратной задачи, учитывающий измерения на всех высотах, станет больше соответствовать модели, чем решение, полученное только по данным наземных измерений, у метода есть будущее.

В работе решается вопрос об эффективности такого подхода.

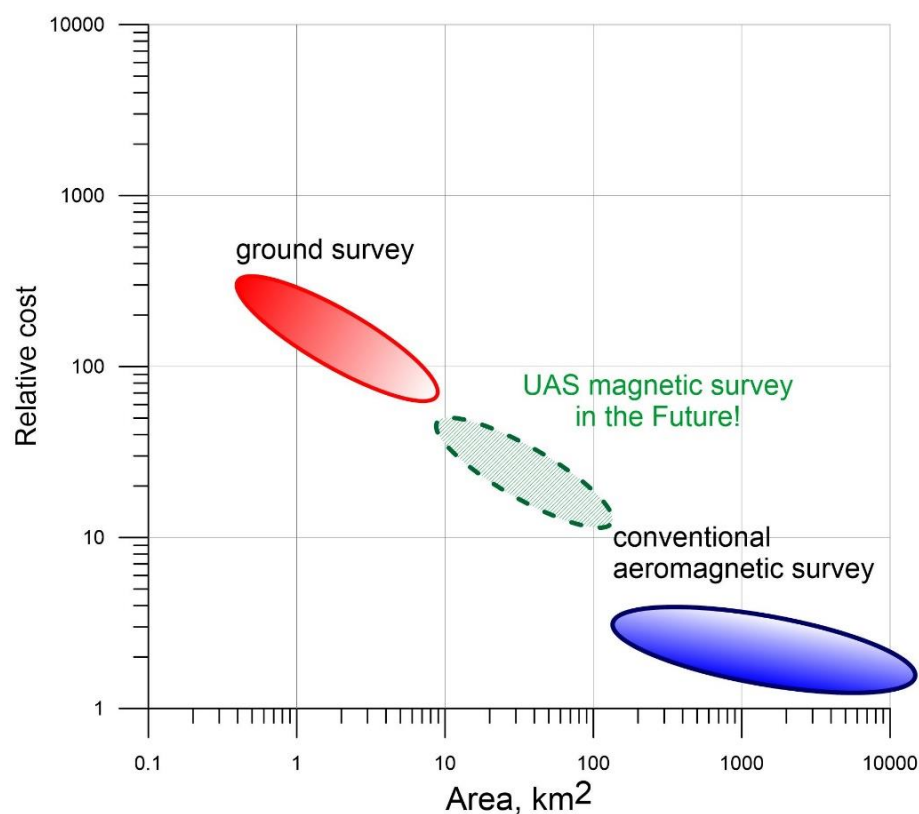


Рисунок 1. Место магнитных съемок при помощи БПЛА среди магнитных съемок разного масштаба и стоимости (Tarasov and Goglev 2019)

**Цель.** Оценить эффективность разновысотной магнитной съемки при поисках глубинных и приповерхностных намагниченных тел

**Задачи.**

1. Построение двух 3D моделей магнитной среды программными средствами
2. Создание сети наблюдения и вычисление значений смоделированного аномального поля на нескольких высотах, подходящих для полетов БПЛА
3. Инверсия данных с указанных съемок в программе для решения обратной задачи магниторазведки (MAG3D) в специальном порядке
4. Построение разрезов эффективных значений магнитной восприимчивости для вычисленных моделей, построение карт и графиков аномального поля
5. Анализ полученной информации и, собственно, оценка эффективности разновысотной магнитной съемки с использованием БПЛА

## ***Глава 1. Литературный обзор***

### ***1.1 Методика полевых работ с использованием БПЛА. Особенности методики маловысотных съемок***

С момента выхода Инструкции по магниторазведке в 1981 г. до 2018 г. не появлялось документа, определяющего правила проведения магниторазведочных работ с беспилотных летательных аппаратов. В 2018 г. Федеральным Агентством по Недропользованию были приняты дополнения к указанной инструкции. Новый документ, «Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки», заполняет пробел «Инструкции», образовавшийся в период распространения БПЛА в аэромагниторазведке. Эти два источника – главный ресурс при подготовке любых магниторазведочных работ.

Согласно инструкции, съемки с применением БПЛА классифицируются по высоте полетов на *низкополётные* (>25 м) и *маловысотные* (>5 м). Оба типа используются для картирования, поисков и разведки месторождений с разной детальностью. Методика низкополетных съемок определена в «Инструкции по магниторазведке» 1981 г. Опыт их использования показывает, что они уже могут конкурировать с традиционной авиасъемкой (Паршин 2018). *Низкополётные* съемки производятся на беспилотных конвертопланах, самолетах и вертолетах с двигателем внутреннего сгорания по методике обычной авиасъемки, *маловысотные* – на мультикоптерах и вертолетах.

Маловысотная съемка призвана заменить наземную везде, где это возможно. По точности она сопоставима с наземной, но гораздо выгоднее с экономической точки зрения, т.к. приносит гораздо меньше временных затрат.

Маловысотные съемки по расположению точек разделяют на площадную и маршрутную. Площадную съемку допустимо производить только при помощи автопилота, т.к. человек за пультом управления не способен обеспечить достаточную аккуратность при такой детальности работ. Работа геологов, таким образом, заключается в подготовке методически



правильного полетного задания и контроль за его исполнением. При маршрутных съемках допускается ручное управление, но только если маршрут необходим для рекогносцировки или тестирования аппаратуры.

Для маловысотных съемок разработана собственная классификация по геологическому назначению. Минимальный масштаб – 1:10 000, менее детальные работы рекомендуется производить при помощи самолета или конвертоплана, пилотируемого или беспилотного. Характеристики сети наблюдений приведены в табл. 1. Самые востребованные геофизические работы имеют масштаб 1:10000 и 1:5000, что также определяет успех и популярность беспилотной маловысотной магниторазведки (Паршин 2018).

*Таблица 1. Масштабы маловысотной съемки(Паршин 2018)*

Масштаб съемки	Расстояние между профилями, м	Максимальное расстояние между точками измерений, м
1:10000	100	10
1:5000	50	5
1:2000	20	2
1:1000	10	1

Точность съемки с БПЛА в большей степени определяется точностью определения положения измерительных датчиков.

Маловысотная съемка производится залетами с обтеканием рельефа при условии точной пространственной привязки измерительного датчика. Сейчас для определения координат БПЛА используются только системы спутникового позиционирования. Причем для прецизионной съемки рекомендуется дополнительно применять такие технические решения, которые обеспечат точность определения положения БПЛА с точностью до десятков сантиметров.

Положение точек рядовых измерений в силу различных факторов (ветер, погрешность спутниковой системы позиционирования, несоответствие скорости измерения и скорости полета и т.д.) может не совпадать с

контрольными. В этом случае позволяет аппроксимировать все измерения на единую сеть полиномом второй степени.

Главное требование к работам любого масштаба: средняя квадратическая погрешность определения положения датчика не должна превышать 10% от расстояния между профилями (Паршин 2018).

Ключевые специфические этапы проведения маловысотной съемки приведены табл. 2.

*Таблица 2. Специфические этапы маловысотных съемок (Паршин 2018)*

<b>Этап работ</b>	<b>Состав работ</b>
Организационный	-Тестовые полеты -Подготовка полетных миссий
Организационный на месте работ	-Организация службы времени (синхронизация работы приборов и записей операторов)
Полевой (минимальный состав полевой группы: оператор БПЛА и инженер-геофизик)	-Беспилотные съемки для создания цифровой модели рельефа -Корректировка полетных миссий -Развертывание станции операторов -Установка БПЛА -Загрузка полетной миссии, взлет, измерения -Возвращение БПЛА, дозаправка или смена батарей при необходимости -Контрольный маршрут и переход на следующую точку взлета

### ***1.2 Беспилотные комплексы в промышленности***

Международная организация гражданской авиации (ИКАО) определяет беспилотник как беспилотное воздушное судно с элементами управления, контролируемые без участия пилота.

Главным преимуществом беспилотной системы перед пилотируемой авиацией является высокая система автоматизации и низкая стоимость.

Современные беспилотные системы наиболее широкое распространение получили при выполнении фотограмметрических работ. На рис. 2 диаграмма иллюстрирует потребность в БПЛА в различных отраслях экономики в Соединенных Штатах. Большая часть (42.9%) приходится на фотосъемку, строительство и коммунальные услуги, и всего 0.3% - на геологические изыскания. В недавней работе Джонатана Ками (Camhi 2016), приведена интересная статистика по применению беспилотников компаниями разного масштаба. 89% американских компаний, использующих беспилотники, имеют меньше 10 сотрудников в штате, и больше 90% - имеют годовой оборот меньше 1 млн \$. Такое распределение демонстрирует обширное и беспрепятственное внедрение БПЛА во всех сферах промышленности, по крайней мере в Америке, однако нет причин считать, что в других странах статистика значительно отличается.

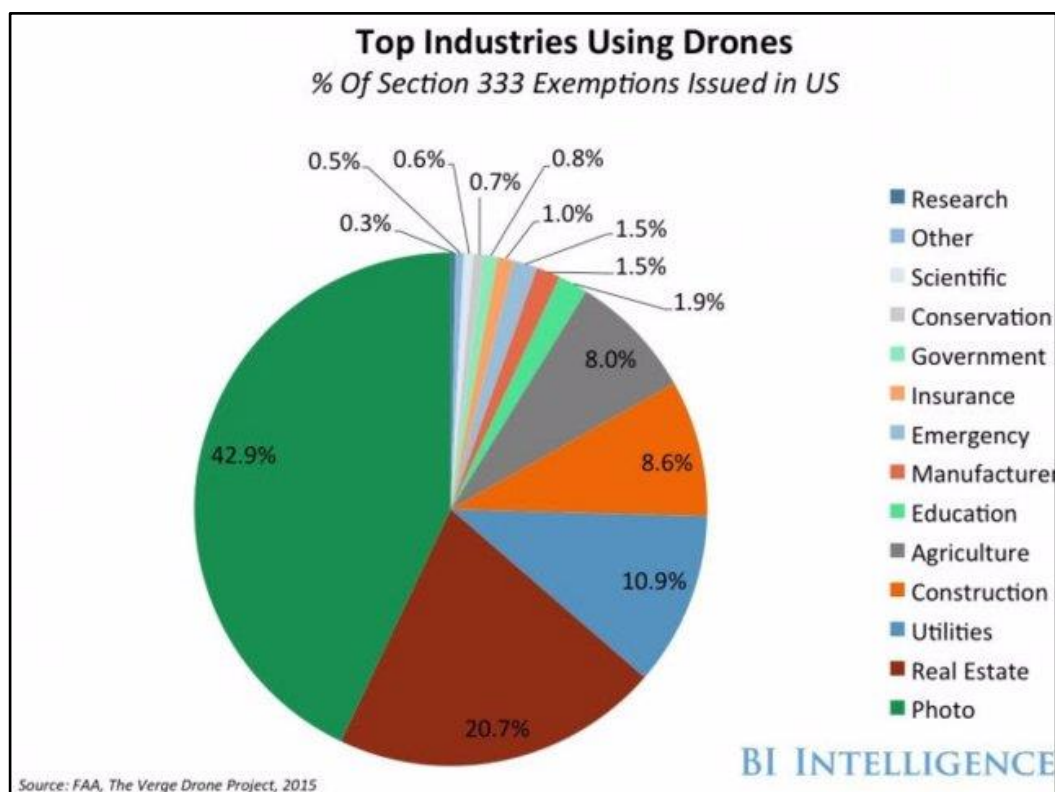


Рисунок 2. Промышленное использование БПЛА (Meola 2016)

Беспилотные авиационные системы классифицируются по нескольким признакам. По типу используемого топлива, габаритам, способу управления и,

по наиболее существенному признаку - по типу подъемной силы. По этому критерию выделяются аэростатические, аэродинамические и реактивные аппараты (рис. 3).

В аэрогеофизике используются беспилотные системы с вращающимся или жестким крылом. Преимуществом первого типа является высокая маневренность и способность зависания в одной точке, а второго - большая скорость, грузоподъемность и продолжительность полета.

Чувствительным датчиком БПЛА остается магнитометр. Внедрение гравиметрических и гамма-спектрометрических измерений ограничивается их большой массой и габаритами. Широко применяется инфракрасная съемка, в меньшей степени - полупроводниковые гамма – спектрометры с достаточно узкой сферой применения.



Рисунок 3. Классификация БПЛА (Trigubovich et al. 2018)

Основными факторами, ограничивающими распространение БПЛА, являются невысокая экономическая эффективность на больших площадях работ, сложности с подбором источника питания и несовершенное законодательство в области регулирования полетов БПЛА. Причина в том, что

технология развивается быстрее, чем успевают появиться нормативные документы, их регулирующие.

В России для использования воздушного пространства необходимо заблаговременно согласовать полеты с местными органами власти, предоставить план полета, заявление на установление местного режима использования воздушного пространства.

В странах, где беспилотные технологии появились в широком доступе раньше, существуют специфические правила их использования. В Великобритании использование БПЛА возможно только в зоне видимости. В Чехии, Франции нельзя использовать беспилотники в местах скопления людей. В США ограничена максимальная высота полетов – 122 м, и введена обязательная регистрация летательного аппарата (Trigubovich et al. 2018).

### ***1.3 Беспилотные аэромагнитные комплексы***

Беспилотный комплекс для магнитной съемки обычно представляет собой высокоманевренный, компактный летательный аппарат типа мультикоптера. Его конструкция обеспечивает возможность вертикального взлета и посадки, и способность к эффективной борьбе с влиянием ветра. БПЛА обязательно комплектуется полетным контроллером с системой автопилотирования и датчиками, контролирующими обстановку вокруг БПЛА: расстояние до земли и до препятствий, в некоторой степени – залесенность, в настоящее время эта задача решена недостаточно эффективно (Паршин 2018).

Магнитных датчиков может быть от одного до нескольких, они прикрепляются к дополнительному подвесу, буксируемой гондоле, или непосредственно к корпусу ЛА. Выбор точки крепления зависит от желания устранить конкретные помехи: ориентационные, магнитные, вибрационные.

Особого внимания заслуживает магнитометр. Главными параметрами, определяющими пригодность магнитометра к аэросъемке, являются его габариты и скорость измерения, поэтому в практике в основном применяются

квантовые магнитометры и магнитометры Оверхаузера. Квантовые показывают лучшие данные и ускоряют съемку, однако заметно дороже. К магнитометру на вариационной станции требования не такие высокие.

Станция управления полетом находится на земле. Она предназначена для контроля полета и внесения корректировок в курс.

БПЛА дополнительно может быть оснащен фотоаппаратурой и другими геофизическими и навигационными системами.

Некоторые современные магниторазведочные комплексы:

- SibGIS UAS
- SkyLance
- MagDrone R3
- UAV-MAG и т.д.
- и серийные, например, ГЕОСКАН 401

Опыт применения магниторазведочных беспилотных комплексов оригинальных конструкций широко представлен в научной литературе, начиная с 2011 г. Авторы разрабатывают собственные комплексы и тестируют их в полевых условиях.

#### ***1.4 Примеры успешного применения магнитной съемки с БПЛА***

##### ***1.4.1 Аэрогеофизические исследования Центрального Метаосадочного пояса Канады***

Исследования проводились в области террейна Мазинау, принадлежащего Центральному Метаосадочному поясу гренвильской провинции. Географически место работ расположено поблизости от города Плевна в провинции Онтарио Канады (рис. 4).

Всего было проведено два исследования – одно в феврале 2010 г., другое – в ноябре 2010 г. Площадь съемки – 8.5 км<sup>2</sup> (Caron 2011). Аэромагнитные исследования проводились отделом Наук о Земле Карлтонского Университета, расположенным в г. Оттава (Caron et al. 2013). Масштаб съемки: 1:5 000.

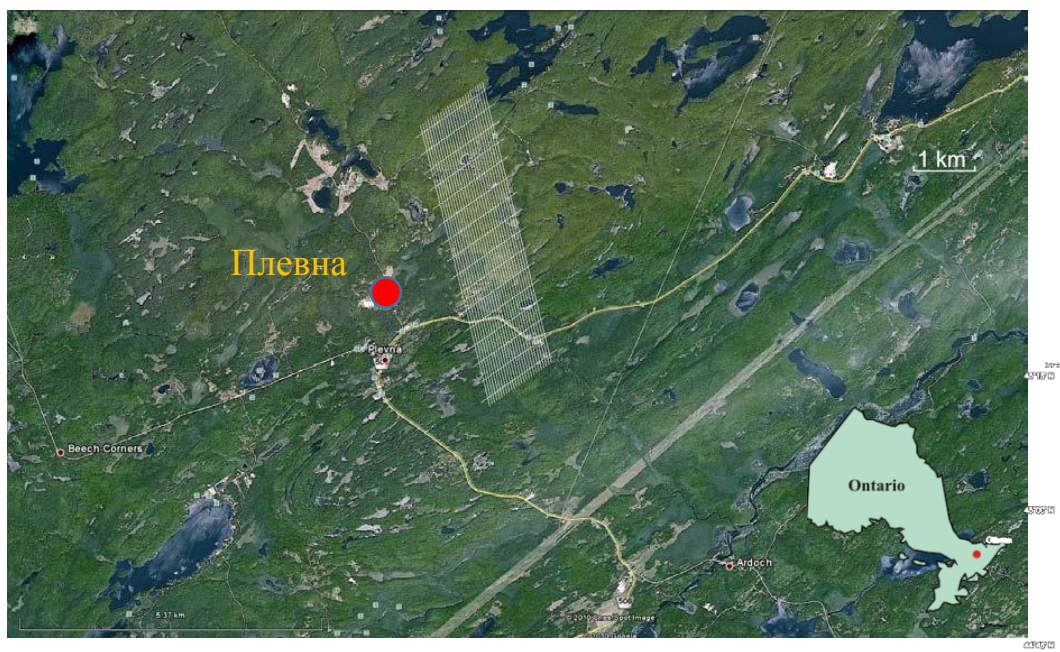


Рисунок 4. Сеть наблюдения и место съемок с Google Maps

Перепад высот в пределах террейна Мазинау в среднем менее 150 м – от 260 м над уровнем моря в южной части района и до 400 м – на севере. Средняя высота – 290 - 335 м над уровнем моря. Обнажения наиболее распространены в районах распространения гранитов (30 – 50% обнажений) и мраморов (5-10%). К областям распространения мраморов приурочены сельскохозяйственные угодья. Большая часть дорог проложена на мощных лимногляциальных отложениях (Easton 2006).

Территория съемок характеризуется изрезанным рельефом. 70% площади имеют градиент высот 10-100 м/км. на 17% - превышает 100 м/км. Участок покрыт смешанным лесом высотой 20-25 м, на нем расположены несколько небольших озер, ручьев и болот (Caron et al. 2013).

Геологическое строение территории сложное. Крупная складка, формирующая структуру, образована двумя этапами складчатости, ее истинная природа неизвестна, но предполагается, что это горизонтальная или вертикальная изоклиная складка. Часть, расположенная непосредственно на сети наблюдений, называется антиформой Плевна, она аналогична северной части синформы Плевна, расположенной южнее. Складка образована метаосадочными породами с внедренными в них



сильномагнитными метавулканитами с порфиробластами магнетита. Они примыкают к слабомагнитным доломитистым и известковым мраморам (Caron et al. 2013). Геологическая карта территории приведена на рис. 5.

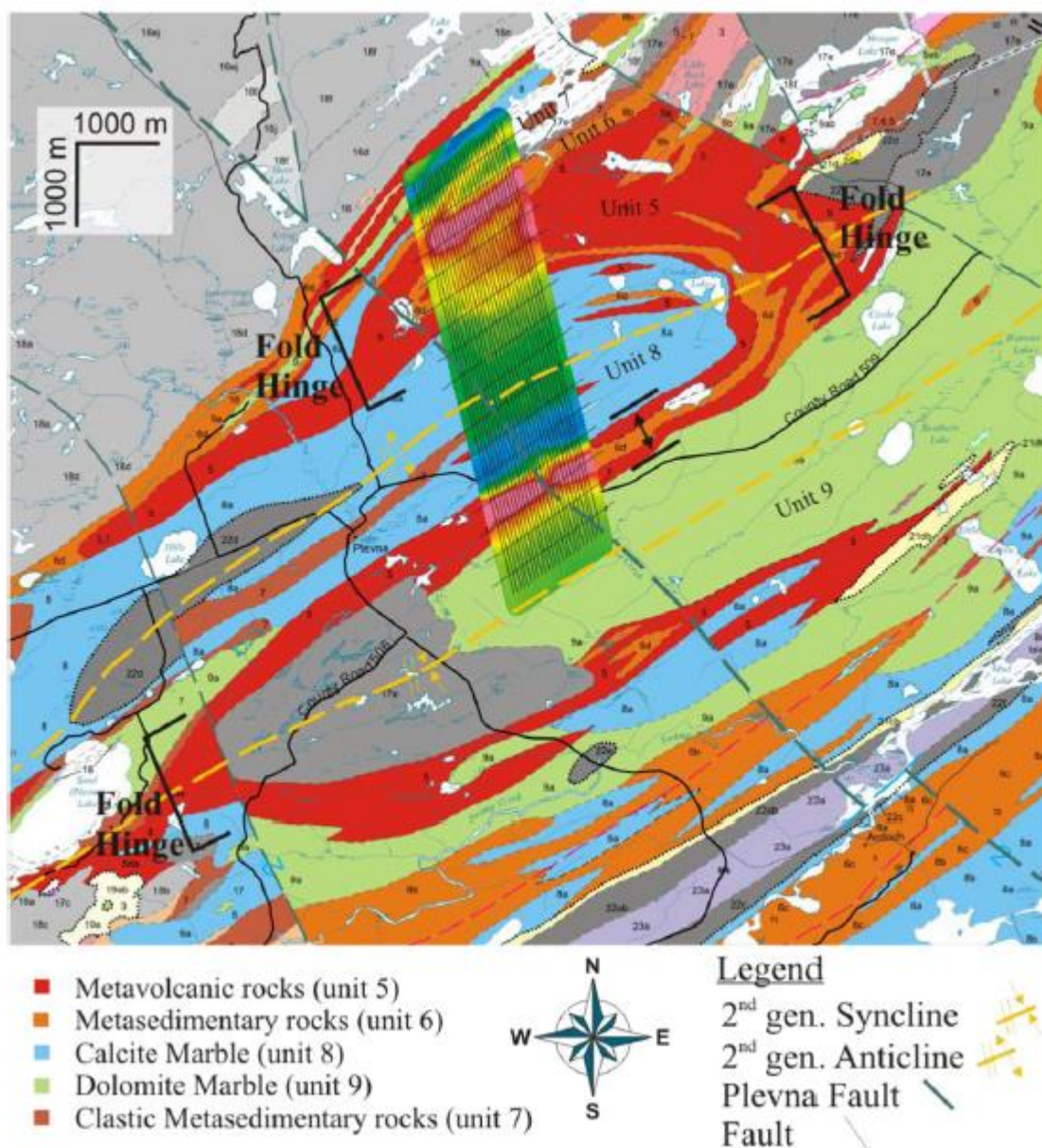


Рисунок 5. Геологическая карта района с нанесенной картой аномального магнитного поля (Caron et al. 2013), (Easton 2006)

Перед работами ставились две главные задачи: экспериментально проверить, насколько мелкие аномалии способен зафиксировать иБПЛА (имитированный БПЛА – макет для проектируемого авторами беспилотного геофизического комплекса GeoSurv II) в сравнении с наземной и авиамагнитной съемкой (определить целесообразность использования иБПЛА



как полноценного разведочного комплекса), и второе – спроектировать конфигурацию магнитометров для GeoSurv II.

По результатам работы, авторы сделали вывод, что применение иБПЛА имеет преимущество по сравнению с аэромагнитной съемкой в сильно расчленённом рельефе за счет полета на более низкой высоте и возможности детального огибания рельефа. Кроме того, стало ясно что, использование иБПЛА способно заменить наземную съемку, т.к. он фиксирует все тренды в изменении аномального поля (рис. 6).

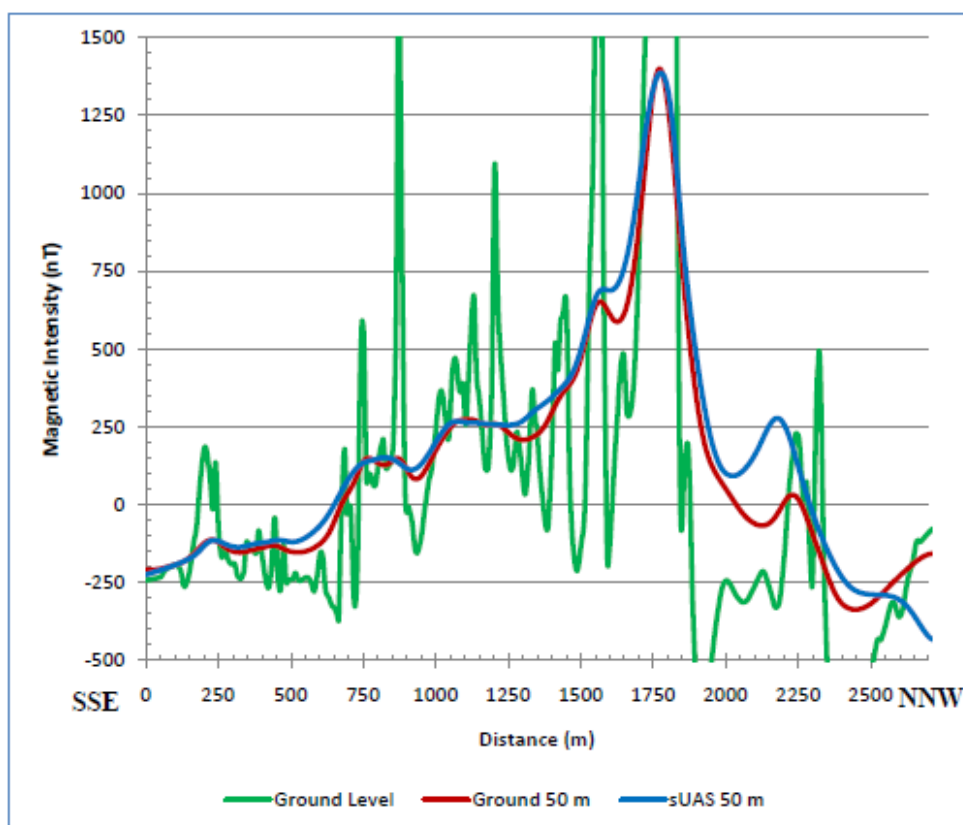


Рисунок 6. Сравнение данных наземной съемки, аэромагнитной и съемки с БПЛА (Caron et al. 2013)

Градиентометрия показала качественные данные, уровень шума от иБПЛА при такой конфигурации в расположении магнитометров не способен заглушить полезный сигнал. Сравнение измеренного поля градиентов и посчитанной модели показано на рис. 7.

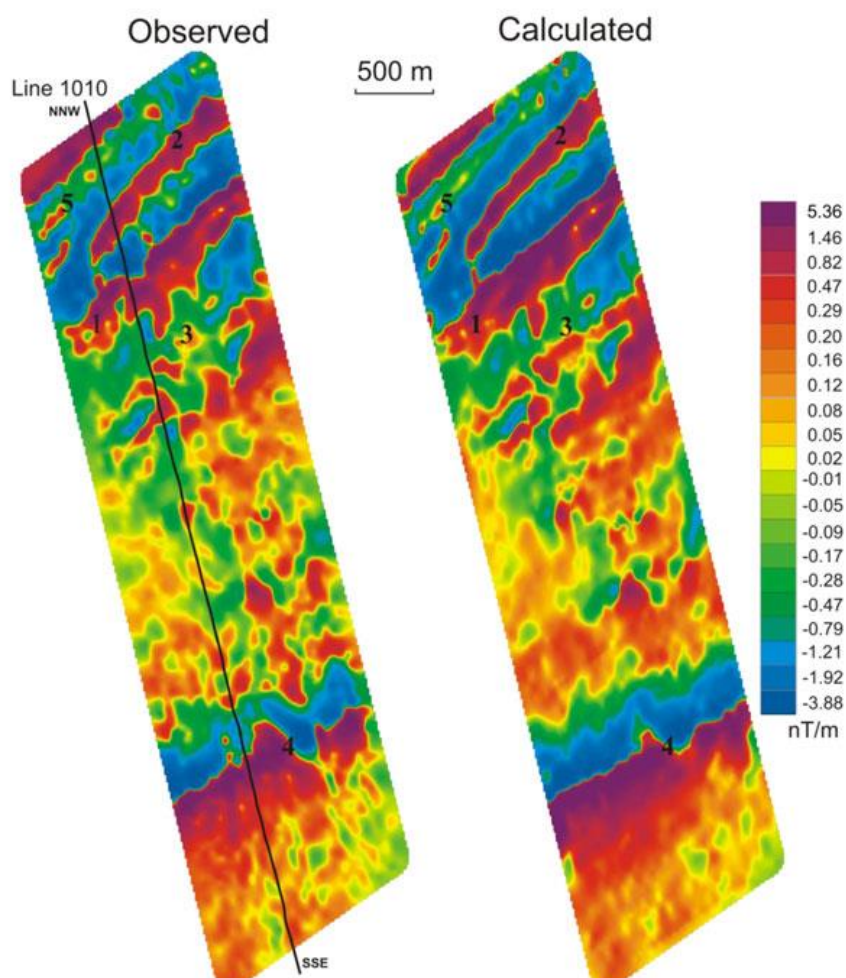


Рисунок 7. Карты измеренного и вычисленного градиентов (Caron et al. 2013)

#### 1.4.2 Аэрогеофизические исследования в Бодайбинском районе

##### Иркутской области

Участок расположен в Бодайбинском районе Иркутской области. Аэромагниторазведочные работы проводились на протяжении лета-осени 2016 года на площади более 9,5 км<sup>2</sup> (“Интернет-Сайт Иркутского Национального Исследовательского Технического Университета” n.d.). Исполнитель: ООО «Геоинформационные технологии – Сибирь». Масштаб съемки: 1:5 000.

Район работ представляет собой сильно пересеченную местность с типичными для Северного Забайкалья углами уклона рельефа (до 40°), зарослями стланика, курумами, заболоченностями (Паршин et al. 2016).

Данный регион, расположен в пределах тектонических единиц: глобальной - Урало-Охотского покровно-складчатого пояса, сформированного в конце палеозоя; трансрегиональной – Байкало-Витимско аккреционоо-коллизиионной-активноокраинной области; региональной – Байкало-Патомской мегазоны и шести территориальных зон – Мамской, Бодайбинской (синклинорных), Чуйской, Аkitканской, Тонодской, Нечерской (выступов) (Перевалов and Срывцев 2013).

Основной целью аэрогеофизических исследований являлись поисково-оценочные работы на золоторудных объектах черносланцевого типа. Дополнительной целью являлась апробация выполнения магниторазведочных работ с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (Паршин et al. 2016).

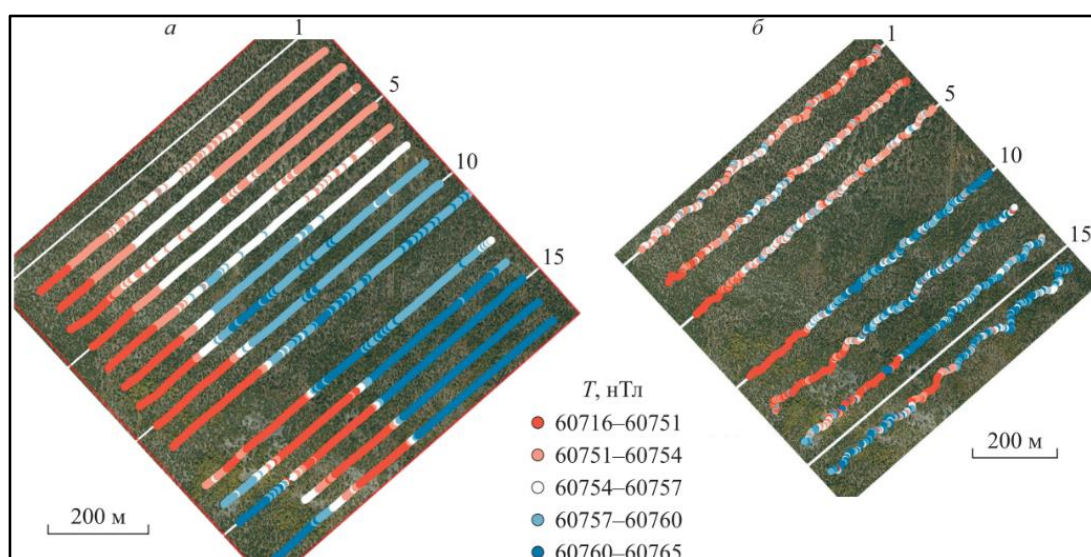


Рисунок 8. Карта графиков модуля полного вектора напряженности магнитного поля, полученного по БПЛА-технологии (а) и пешеходной съемкой (б) (Паршин et al. 2016)

Произведенные исследования показали неоспоримую надежность разработанного АГФ комплекса и положительный результат проведенных работ. Низковысотная БПЛА-магниторазведка позволяет получать данные более высокого качества по сравнению с пешеходной съемкой при существенно более низкой стоимости. БПЛА и наземная съемка

характеризуются сходной чувствительностью и фиксируют одни и те же объекты, в связи с чем на приведенных примерах какие-либо явные преимущества в качестве данных наземной съемки отсутствуют. Как было отмечено авторами работы (Паршин et al. 2016), на данный комплекс возможна установка гамма-спектрометра и лидарного сканера, что обеспечит комплексирование данных аэрогеофизической разведки с высокоточной цифровой моделью местности. На рис. 8 – карты участка с наложенными профилями магнитной съемки, наземной и воздушной.

Признанной погрешностью является 2,5 нТл. Так выделенные аномалии в 3,5 нТл может быть не связана с геологическими структурами участка работ, а указывать на влияние БПЛА и его компонент или других факторов. Для однозначного выделения аномалий меньшей амплитуды следует уменьшить погрешность до близкой к абсолютной погрешности прибора (до 1 нТл).

Также стоит отметить экономическую выгоду в проведении работ такого типа. Авторы указывают (Parshin et al. 2018; Паршин et al. 2016), что сметная стоимость по данному участку работ пешеходной магниторазведки без предварительных топогеодезических работ оценивается в 58 тыс. руб./км<sup>2</sup> съемки масштаба 1:10 000, в то время как беспилотная съемка рентабельна уже при 30 тыс. руб./км<sup>2</sup>.

## ***Глава 2. Моделирование разновысотной магнитной съемки***

В работе рассматриваются две модели магнитной среды. Они отличаются по расположению тел, форме, их магнитным свойствам, по магнитным свойствам вмещающей среды, а также выбором сети наблюдения. Обе модели созданы в программе для моделирования аномальных магнитного и гравитационного полей в объемной среде Potent (с.41). С ее помощью была смоделирована магнитная среда и произведен расчет аномального поля на разных высотах.

Над каждой моделью проведено несколько «полетов» - вычислено аномальное поле над моделью при фиксации координаты Z 4-5 раз.

Эффективность разновысотной съемки можно оценить экспериментально. В программу для 3D инверсии магнитных данных Mag3D (с.38), последовательно загружались съемки со все возрастающих высот. Модель, вычисленная на предыдущем шаге, используется программой в качестве эталонной при новой инверсии. После сравнения разрезов полученных моделей возможно будет решить, насколько эффективен такой подход.

Порядок инверсии схематически изображен на рис. 9. На первом шаге осуществляется инверсия наблюдений на земле, матрица стартовой модели заполнена нулевыми или небольшими положительными значениями. На втором – результат с предыдущего шага принимается в качестве стартовой модели для инверсии данных съемки с высоты, например, 30 м (как в модели №1). Процесс повторяется несколько раз. По исчерпанию всех данных, результат принимается окончательным. Его итоговый разрез необходимо сравнить с разрезами моделей, рассчитанных на основе данных съемки только с одной высоты.

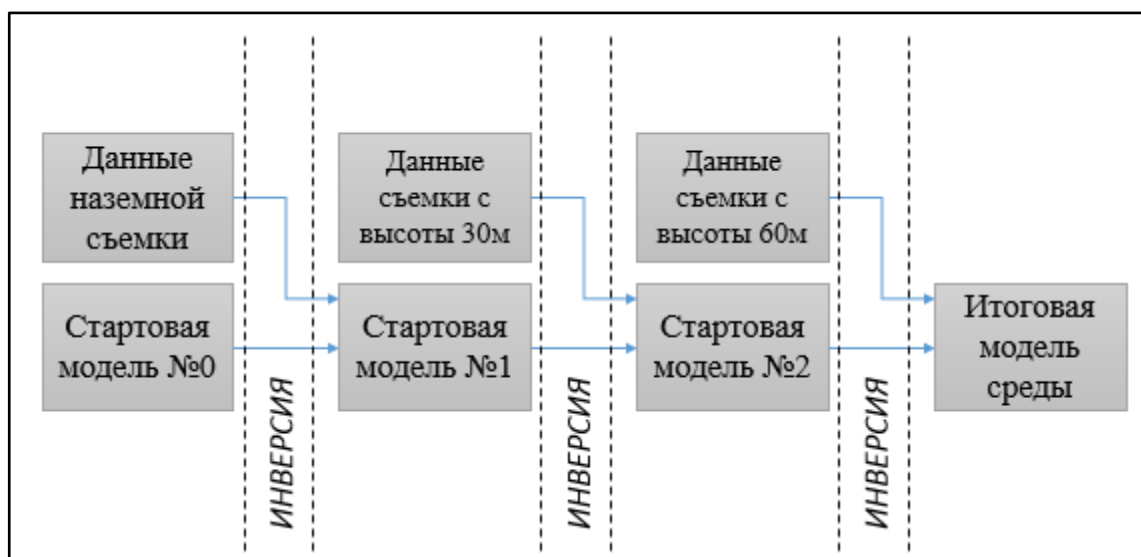


Рисунок 9. Схема инверсии при анализе данных с нескольких высот

### 2.1 Теоретические особенности инверсии многовысотных данных

С чисто математической точки зрения, добавление данных новых высот в инверсию не должно приносить никакой новой информации. Действительно, произвольный набор намагниченных тел можно заменить эквивалентным тонким магнитным слоем (Блох 2009). Затем пересчитать его поле на все желаемые высоты не составляет труда. Ожидать проявления на разрезах новых геологических структур при этом не приходится. Потенциал объемного тела заменяется по формуле (1):

$$U(a) = \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{I_{nor}(q)}{L_{qa}} dS, \quad (1)$$

Где  $I_{nor}(q)$  – проекция намагниченности на внешнюю нормаль к поверхности,  $L_{qa}$  – расстояние между точкой наблюдения и точкой на поверхности. Эквивалентный слой вертикального пласта находится на его верхней кромке (рис. 10).

В данном исследовании, однако, при осуществлении инверсии в предложенном порядке, с добавлением данных новой высоты возрастает глубинность исследования.

Такое поведение может быть вызвано несколькими причинами:

1. В реальные измерения всегда вносится случайная ошибка. Таким образом, измерение поля на другой высоте не будет эквивалентно пересчету поля.
2. В настоящих геологических условиях существуют ограничения по распределению магнитных свойств. Пересчет реального поля не принесет дополнительной информативности в силу того, что поле над объемными телами на другой высоте не совпадает с полем на той же высоте эквивалентного слоя от этих тел.
3. Используемое ПО (MAG3D) работает по принципу простого подбора и не использует физические закономерности. Поэтому появление на разрезах тел именно там, где они помещались, не связано с решением физической задачи по пересчету поля.
4. Для ослабления влияния приповерхностных тел используется весовая функция глубины и разновысотные съемки
5. Магнитная восприимчивость пород считается строго большей нуля. Остаточная намагниченность, по предположению, отсутствует.

В связи с перечисленным, была предпринята попытка усовершенствовать инверсию съемками с разных высот. Далее в главе описаны магнитные модели, магнитные “съемки” над ними и результаты инверсии.

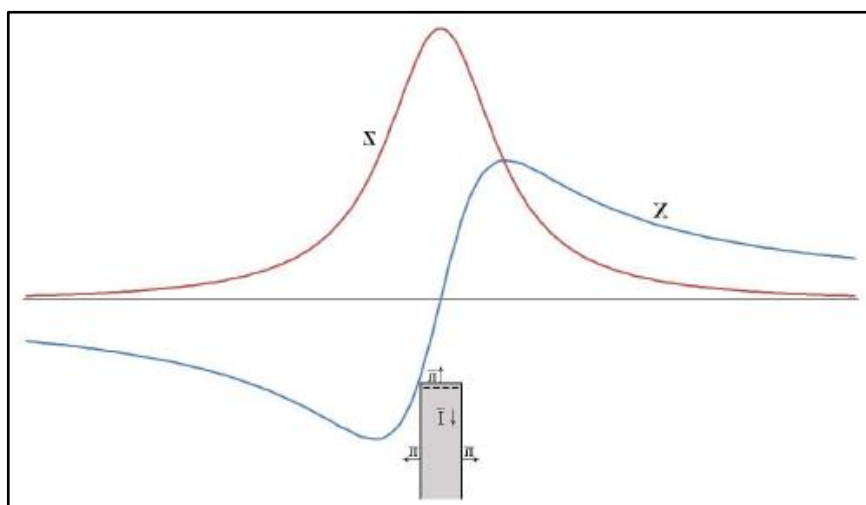


Рисунок 10. Эквивалентный слой вертикального пласта (Блох 2009)

## 2.2 Модель №1

Для тестирования методики использовались модельные данные распределения магнитной восприимчивости. Модель создана в программе Potent. Параметры тел указаны в табл. 3. Магнитная восприимчивость вмещающих пород – 0.002 СИ. Площадь съемки – 1 км<sup>2</sup>.

Таблица 3. Некоторые параметры намагниченных тел

№ тела	Геометрическая форма	Размеры А, В, С (м)	Положение центра верхней кромки (м)	Магнитная восприимчивость (СИ)
1	Параллелепипед	150, 150, 70	-100	0.05
2	Параллелепипед	600, 50, 300	-10	0.01
3	Параллелепипед	450, 30, 200	-60	0.01
4	Параллелепипед	200, 300, 150	-90	0.03
5	Параллелепипед	200, 200, 30	-20	0.03
6	Наклонный цилиндр	H=300, A=100, B=200	-80	0.05
7	Параллелепипед	600, 300, 400	-320	0.02

Сети наблюдений приведены в табл. 4. На рис. 11, 16, 17 изображены аномальные поля на всех высотах с искусственно добавленным шумом, распределенным по нормальному закону с дисперсией 0.5 нТл и средним – 0 нТл. Добавление шума призвано имитировать реальную съемку. Цветными контурами обозначены проекции тел.

Графики аномального поля на одном их профилей (x=480м) представлены на рис. 12. С увеличением высоты, аномалии становятся более сглаженными, уменьшается вклад локальной составляющей магнитного поля.



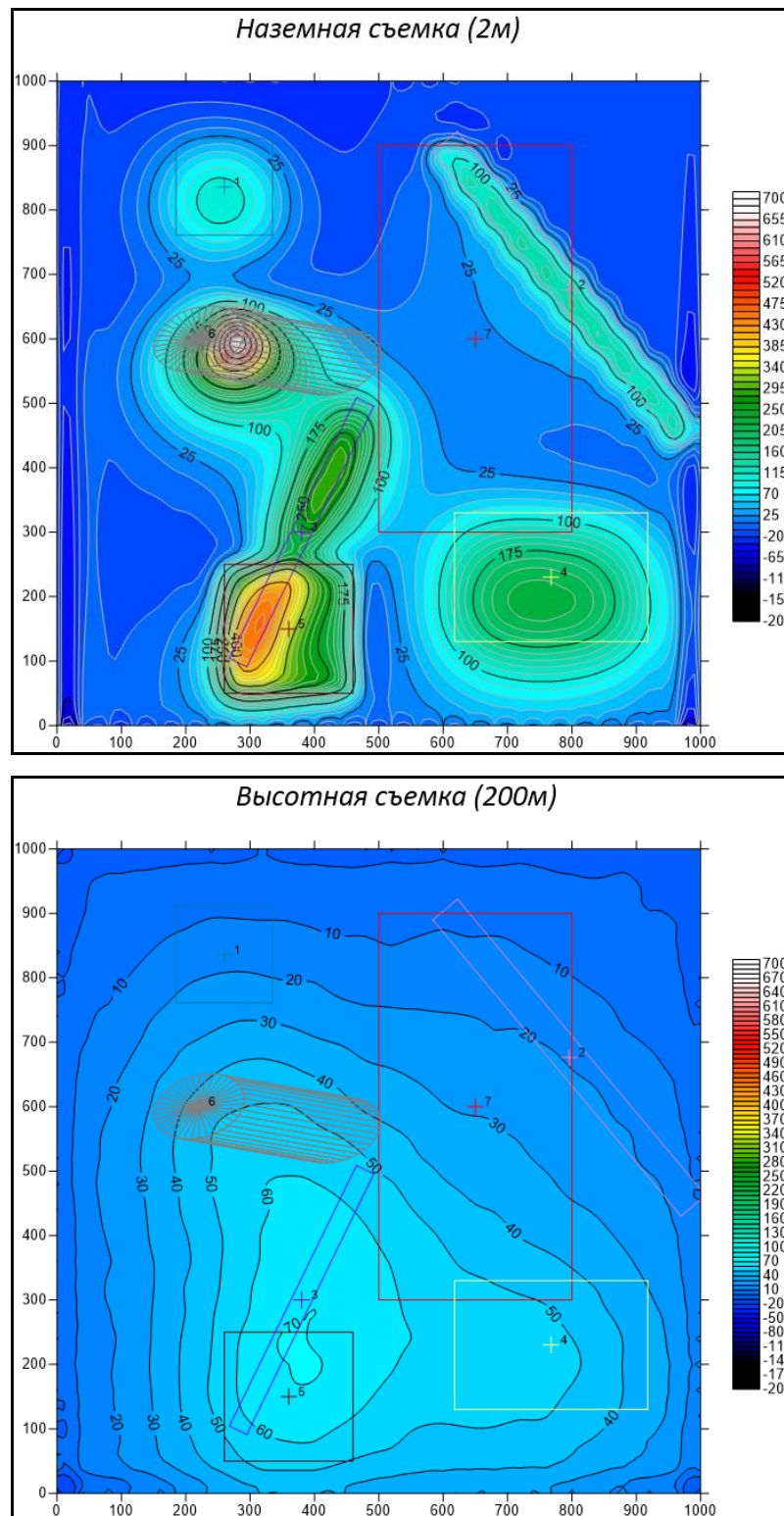


Рисунок 11. Аномальное поле при наземной съемке и съемке с высоты  
200 м

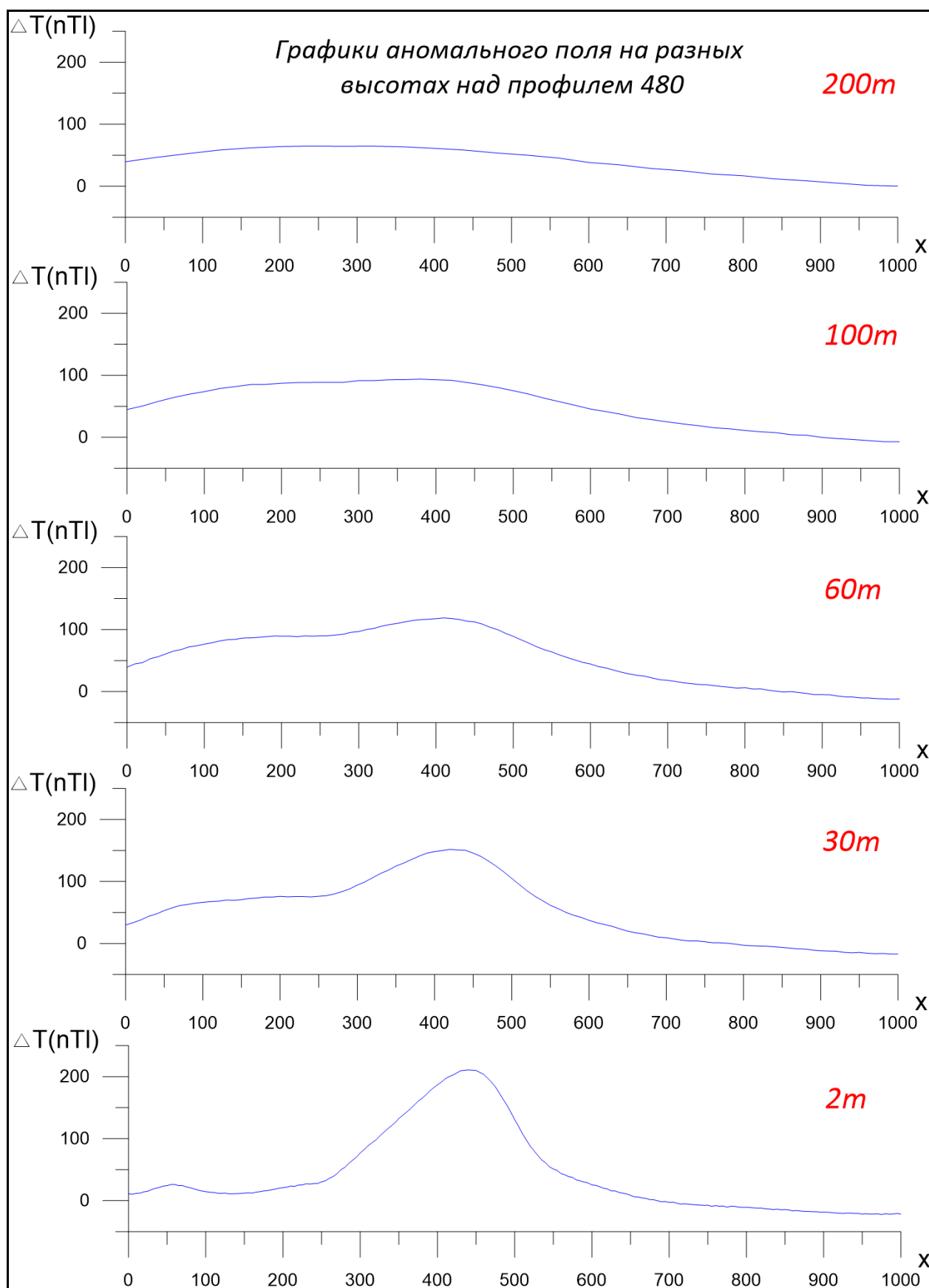


Рисунок 12. Графики аномального поля по профилю 480

Таблица 4. Сеть наблюдений

Высота съемки (м)	Шаг по профилю (м)	Шаг между профилями (м)
2	5	40
30	10	40
60	10	40
100	20	40
200	40	40

### 2.3 Модель №2

Параметры тел указаны в табл. 5. Магнитная восприимчивость вмещающих пород – 0.0001 СИ. Площадь области исследования – 1 км<sup>2</sup>.

Таблица 5. Некоторые параметры намагниченных тел

№ тела	Геометрическая форма	Размеры А, В, С (м)	Положение центра верхней кромки (м)	Магнитная восприимчивость (СИ)
1	Линза	Н=50, А=500, В=500	-27	0.01
2	Параллелепипед	100, 200, 200	-61	0.01
3	Параллелепипед	400, 400, 250	-312	0.01
4	Дайка	Ширина=30 Н = 330 $\alpha = 64$	0	0.01
5	Параллелепипед	100, 100, 50	-50	0.01
6	Параллелепипед	150, 300, 60	-50	0.01
7	Дайка	Ширина=50 Н = 400 $\alpha = 67$	-10	0.01
8	Параллелепипед	20, 20, 20	-1	0.01

9	Параллелепипед	20, 20, 20	-1	0.01
10	Параллелепипед	50, 30, 20	0	0.01
11	Параллелепипед	20, 20, 20	0	0.01
12	Параллелепипед	50, 30, 20	-20	0.01

Параметры сети наблюдения приведены в табл. 6.

*Таблица 6. Сеть наблюдений*

Высота съемки (м)	Шаг по профилю (м)	Шаг между профилями (м)	Длина профиля (м)
2	5	40	1000
50	8.5	50	1200
100	15.4	74	1400
200	58	130	1800

Сеть наблюдения для второй модели имеет форму сужающейся книзу усеченной пирамиды (рис. 15). Такая конфигурация полетной сети нужна, чтобы сэкономить на количестве измерений, учесть краевые эффекты на границе области исследования и влияние соседних геологических структур.

На рис. 13, 14, 23, 24 (с. 47) изображены аномальные поля на всех высотах с искусственно добавленным шумом, распределенным по нормальному закону с дисперсией 0.5 нТл и средним – 0 нТл. Шум имитирует реальные условия съемок. Цветными контурами на картах обозначены проекции тел на поверхность.

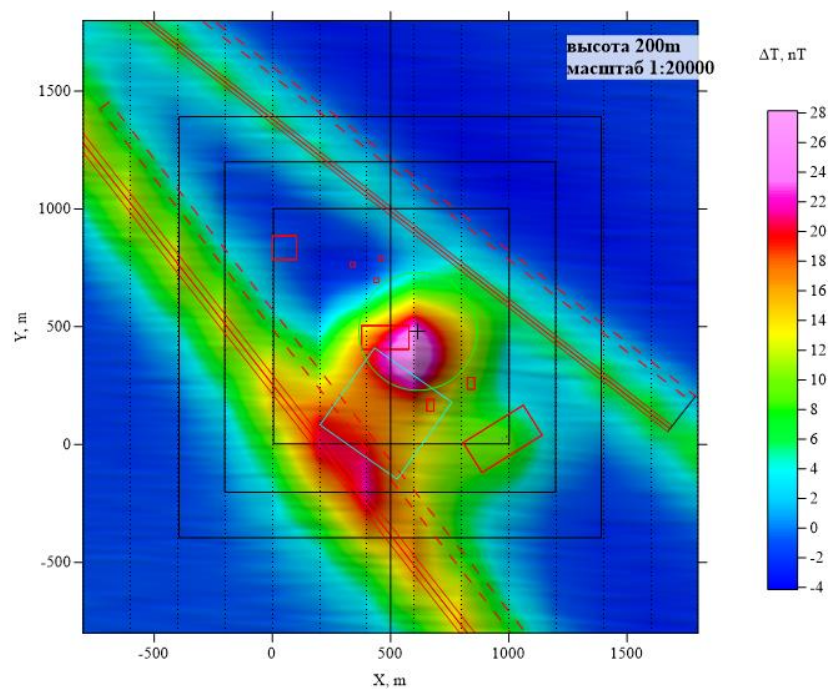


Рисунок 13. Карта аномального поля на высоте 200 м

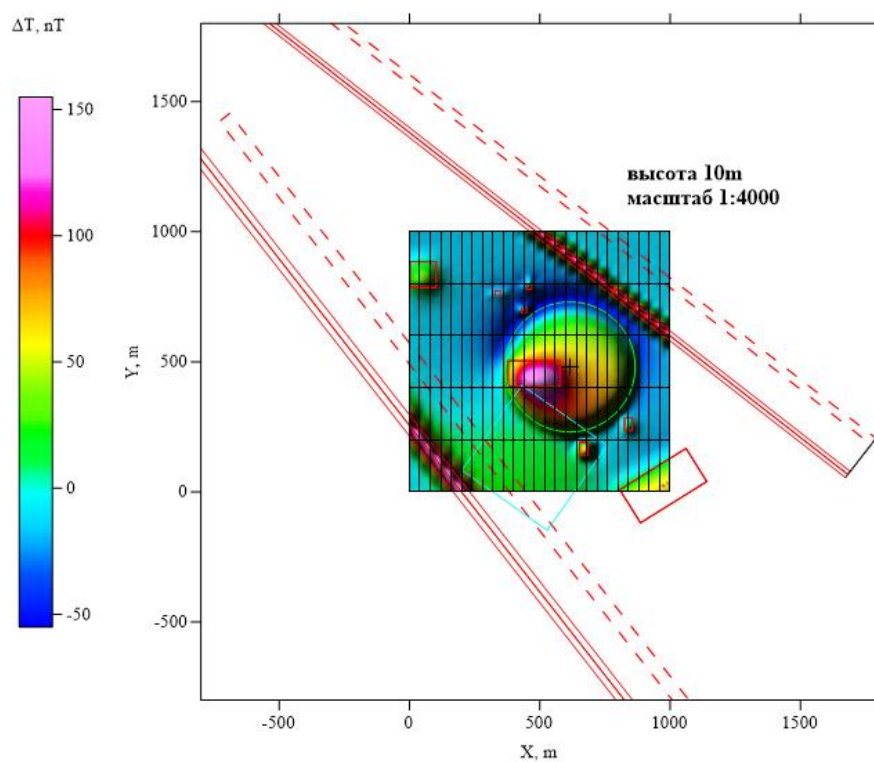


Рисунок 14. Карта аномального поля на высоте 10 м

### ***Глава 3. Результаты инверсии***

#### ***3.1 Инверсия данных для модели №1***

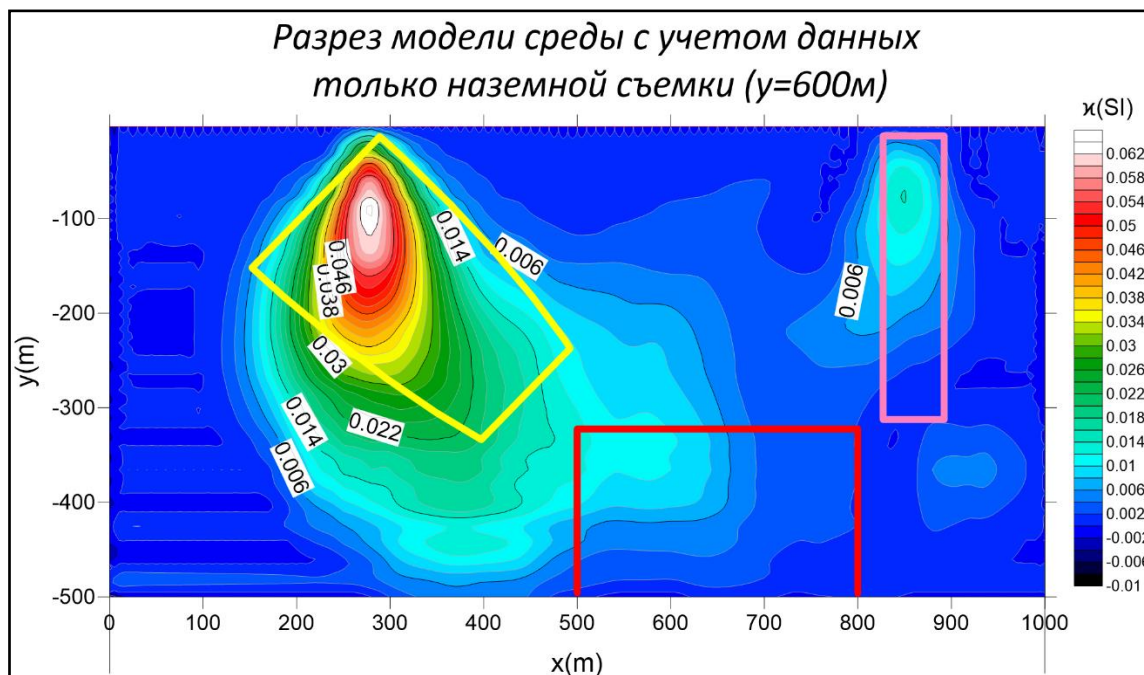
Инверсия была проведена в порядке, приведенном ранее (с. 21). Результатом работы программы MAG3D стали 5 объемных моделей распределения эффективных значений магнитной восприимчивости. Последовательно, на каждой из них на глубине от 300 до 500 м в красном контуре, соответствующем расположению тела №7, растут значения магнитной восприимчивости, ячейки локализуются в пределах контура. Таблица 7 наравне с разрезами иллюстрирует качество подбора на всех этапах инверсии.

*Таблица 7 Диапазон подбора магнитной восприимчивости на месте  
расположения тел*

	№ тела, max - min (нТл)		
Учтенные высоты (м)	2	6	7
Значения К (ед. СИ) на высотах:	0.01	0.05	0.02
2 м	0.002-0.016	0.016-0.064	0.002-0.012
30 м	0.003-0.010	0.010-0.052	0.004-0.010
60 м	0.003-0.008	0.007-0.042	0.006-0.012
100 м	0.003-0.007	0.006-0.036	0.006-0.014
200 м	0.003-0.007	0.006-0.032	0.006-0.012

На рис. 12-13 приведены разрезы модели по профилю у=600 после инверсии наземной съемки и инверсии с учетом всех высот. На рис. 14 – перпендикулярный разрез (х=700). В обоих случаях на глубине проявляется новое тело, его магнитная восприимчивость растет, а у менее глубинных тел – уменьшается.

Сеть наблюдения над этой моделью имеет форму куба, с ростом высоты площадь наблюдения не увеличивается. На самом верхнем уровне в одной точке учитывается интегральный отклик от тел, расположенных уже весьма далеко от области наблюдения. Однако и при такой сети, методика показывает хорошие результаты. В следующей модели сеть наблюдения сформирована по-иному.



*Рисунок 12. Разрезы магнитной восприимчивости после инверсии  
наземной съемки. Разрез  $y=600$*



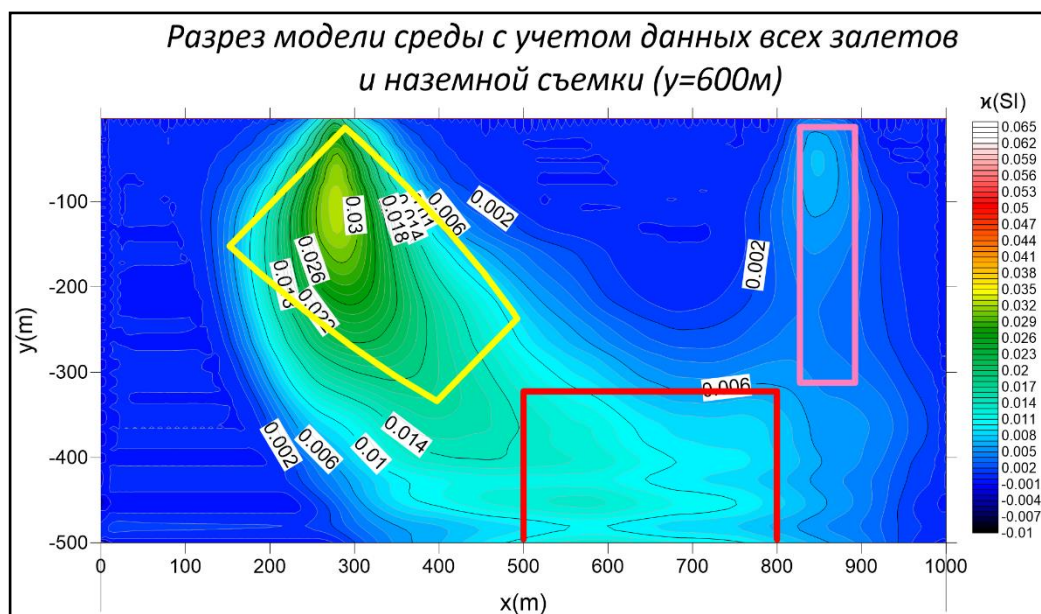
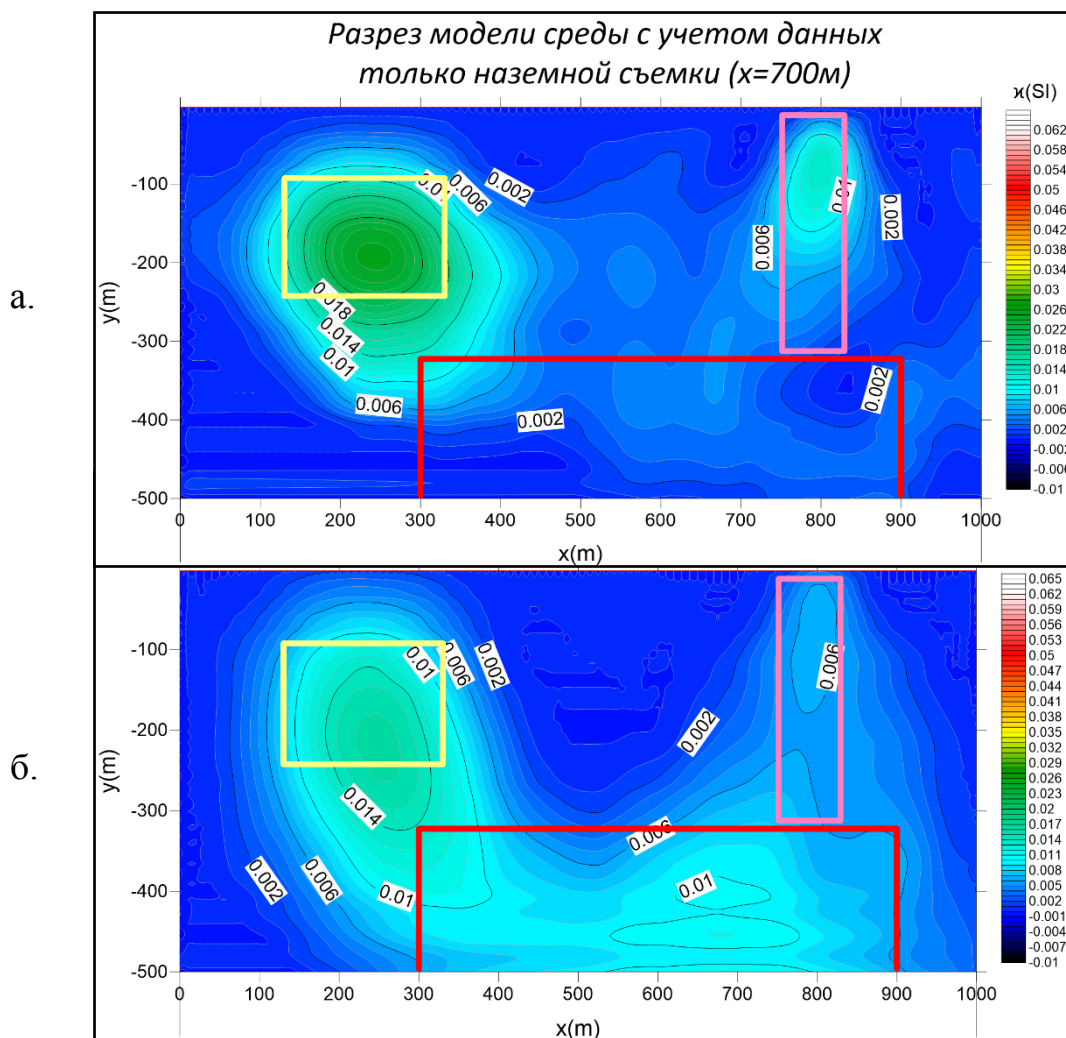


Рисунок 13. Разрезы магнитной восприимчивости после учета всех высот в инверсии. Разрез  $y=600$

Рисунок 14. Разрезы магнитной восприимчивости после учета только наземной съемки (а) и после учета всех высот в инверсии (б). Разрез  $x=700$





### 3.2 Инверсия данных для модели №2

По такой же методике, как и для первой модели, проведена инверсия. Как и в первом случае при добавлении очередной порции данных, улучшается качество подбора программой магнитной восприимчивости у глубинных тел и «расплываются» менее глубоко заложенные. Соответствующие разрезы приведены в Приложении Б (с. 48-49). Итоговый разрез по профилю СВ направления изображен ниже (рис. 15).

На графиках изображены значения аномального поля. По ним видно, как с ростом высоты убывает локальная составляющая, и графики становятся более сглаженными.

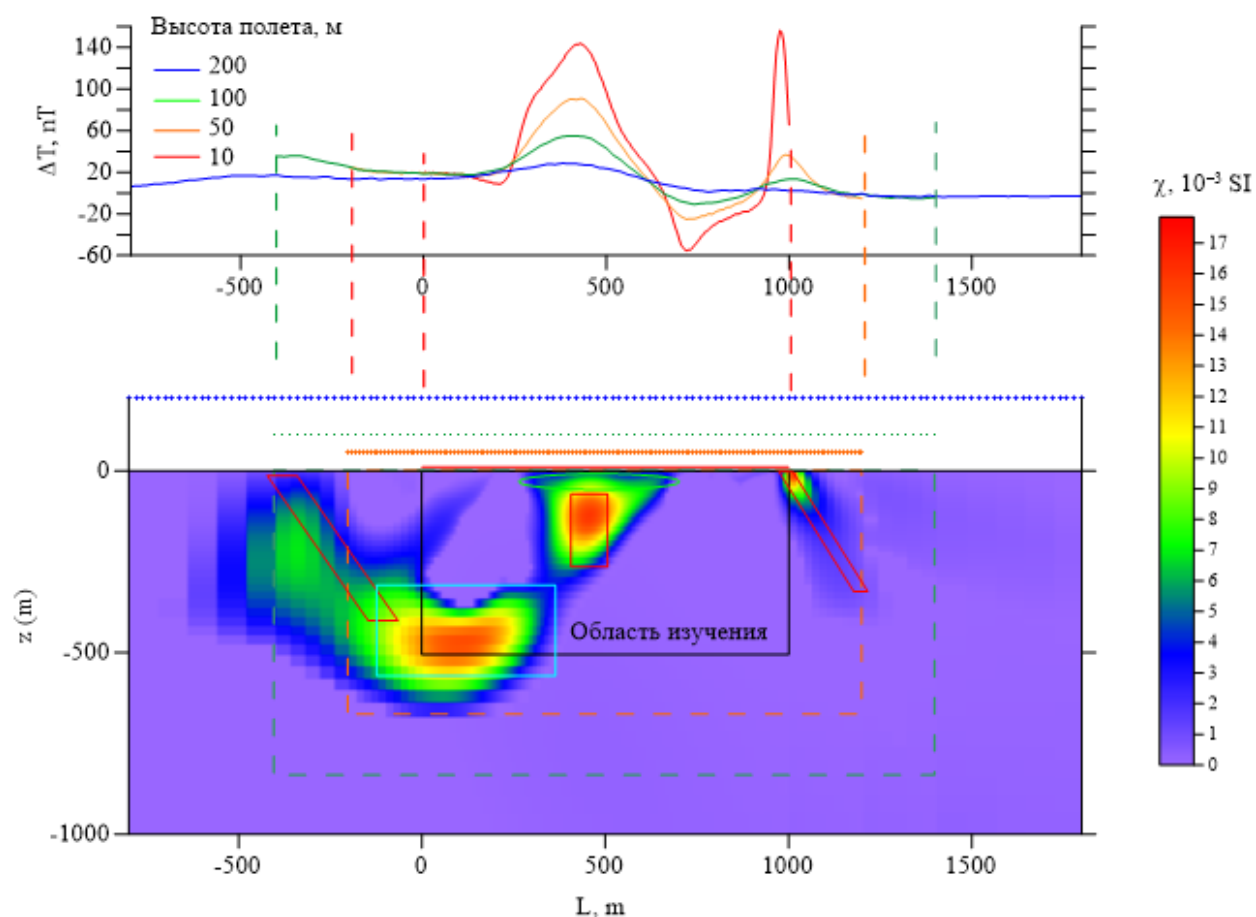


Рисунок 15. Окончательный результат инверсии, схема сети наблюдения и графики аномального поля на нескольких высотах

#### ***Глава 4. Анализ результатов и решение вопроса об эффективности методики***

По построенным разрезам и анализу 3D моделей в MeshTools (с. 42) становится очевидным улучшение результатов обработки данных программой MAG3D. Поэтому, в целом, результаты моделирования можно считать удовлетворительными.

При добавлении данных с новой высоты в нижней части разрезов появляются новые тела, с каждой итерацией форма аномальной области все ближе приближается к смоделированной. Значения магнитной восприимчивости растут в границах этой области и стремятся к модельным данным.

При этом, однако, в приповерхностных телах происходят противоположные эффекты: контуры тел расплываются, магнитная восприимчивость их уменьшается, растет ошибка подбора значений магнитной восприимчивости.

У методики есть перспективы развития. Это выбор оптимальных системы наблюдений и порядка добавления новых высот в инверсию - в обратной последовательности или их чередование некоторым способом. Как показывает моделирование, при добавлении новых данных последовательно возрастает детальность разреза по направлению на глубину. При этом растет неоднозначность в более верхних горизонтах. Таким образом, из этого следует, что необходимо заранее делать предположение о глубине заложения интересующих объектов и учитывать ее при планировании полетного задания и создания сети наблюдения. В работе (Cunningham 2016) уже проводились такие расчеты. Автор моделировал аномальное поле на нескольких высотах при измерении его тремя аэрогеофизическими комплексами - 2 на основе БПЛА и 1 – самолетный вариант. Для каждого комплекса им были рассчитаны минимальный предел обнаружения магнитной восприимчивости и максимальная глубина зондирования.

## ***Заключение***

В последнее время в геофизике широко проявлен интерес к аэромагнитной съемке с применением БПЛА. Это вызвано их большой производительностью и относительно небольшой стоимостью. Беспилотные системы занимают прочные позиции на рынке и способны со временем заменить наземную съемку и потеснить авиационную. Ежегодно большое количество статей посвящается разработке геофизических комплексов на БПЛА, разрабатывается методика и аппаратное оснащение для этого принципиально нового типа работ, разрабатываются системы, способные осуществлять измерения градиента.

Нет повода предполагать, что в будущем ситуация изменится.

За счет высокой производительности и скорости, съемка с нескольких высот, вероятно, будет в силах окупить себя. Настоящая работа показала, что за счет увеличения количества измерений полетами на нескольких уровнях над землей, стабильно увеличивается чувствительность ПО, осуществляющего инверсию методом подбора, к глубоко погруженным объектам. При анализе моделей, посчитанных с учетом данных нескольких залетов можно значительно повысить качество интерпретации данных магнитной съемки.

## ***Список литературы***

### *Монографии:*

1. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий 2009. С. 231.
2. Перевалов О.В., Срывцев Н.. Геологическое строение и минерализация Бодайбинского и Мамского горнорудных районов / О.В. Перевалов, Н.. Срывцев, Москва: ГЕОКАРТ:ГЕОС, 2013. 276 с.
3. Easton R.M. Precambrian, Cloyne-Plevna-Ompah Area, Northern Mazinaw Domain, Grenville Province / R.M. Easton, Ontario: Queen's Printer for Ontario, 2006, 2006. 165 с.

### *Диссертации:*

1. Caron R.M. Aeromagnetic Surveying Using a Simulated Unmanned Aircraft System by A thesis submitted to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in. Ontario, Ottawa, 2011.
2. Cunningham M. Aeromagnetic Surveying with Unmanned Aircraft Systems. A thesis submitted to the Faculty of Graduate and Postdoctoral Affairs in partial fulfillment for the degree of Master of Science. Ottawa, Ontario, 2016.

### *Статьи в журналах:*

1. Паршин А.В. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № 6 (6). С. 150–155.
2. Camhi J. The Drones Report. Market Forecasts, Key Players and Use Cases, and Regulatory Barriers to the Proliferation of Drones / J. Camhi, BI Intelligence, 2016.
3. Caron R.M. [и др.]. Aeromagnetic surveying using a simulated unmanned aircraft system // Geophysical Prospecting. 2013. № 2 (62). С. 352–363.
4. Parshin A. V. [и др.]. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geospatial Information Science. 2018. № 1 (21). С. 67–74.

*Тезисы в докладах:*

1. Tarasov A., Goglev D. Multilevel UAS magnetic survey as a new method to increase efficiency of the magnetic prospecting 2019
2. Trigubvich G. [и др.]. Using Unmanned Aerial Vehicles in Aerogeophysics Almaty, Kazakhstan: EAGE, 2018.

*Ресурсы сети Интернет:*

1. Интернет-сайт Иркутского национального исследовательского технического университета [Электронный ресурс]. URL: <https://www.istu.edu/news/28456/> (дата обращения: 15.03.2019).
2. Meola A. Drone usage is thriving in these three U.S. states [Электронный ресурс]. URL: <https://www.businessinsider.com/drone-usage-is-thriving-in-these-three-us-states-2016-4>.

*Нормативно-правовая документация:*

1. Паршин А.В. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки // 2018. 32 с.

## ***Приложение А. Информация об использованных программных средствах***

### ***а. MAG3D***

MAG3D – программная библиотека для прямого и обратного моделирования трехмерных магнитных данных, полученных на поверхности, в скважинах и воздушных. Разработана канадским Университетом Британской Колумбии, расположенным в Ванкувере. MAG3D входит в пакет геофизического ПО UBC-GIF.

Программа характеризуется следующими положениями:

- прямого моделирования аномального поля от погруженного трехмерного тела на поверхности Земли с заданной топографией
- расчета аномального поля внутри объема магнитного тела, а также над поверхностью Земли, имитируя разновысотную авиасъемку
- магнитная восприимчивость тел должна быть невысокой, т.к. алгоритм будет работать неверно в случаях, когда магнитная восприимчивость превышает некоторый предел, вызывая заметное размагничивание
- алгоритм не учитывает присутствие остаточной намагниченности
- программа решает обратную задачу по данным скважин, воздушным и наземным магнитным данным. Инверсия представляет собой задачу оптимизации, в ходе которой минимизируется целевая функция и формируются синтетические данные, удовлетворяющие наблюдениям. Недостаток информации о расстоянии между источником и точкой измерения компенсируется введением дополнительных весовых коэффициентов. На конструируемую модель налагается условие гладкости распределения магнитной восприимчивости и близость к эталонной модели. Для повышения качества решения обратной задачи, можно дополнительно ввести данные о распределении магнитной восприимчивости на поверхности. Подбор параметра регуляризации зависит от известной ошибки измерений.

-с целью уменьшить время расчетов и объем используемой памяти в MAG3D реализовано вейвлет-сжатие матрицы чувствительности

В комплект программы на платформе Windows входят графический интерфейс и утилиты для визуализации базы данных измерений и результатов инверсии.

Скорость работы программы значительно улучшена в 4 версии, задача по инверсии данных 1564 точек наблюдения с 417 582 ячейками подбора, решается 1:47 ч, из них 20 минут уходит на расчет матрицы чувствительности (Pentium IV, 1 Gb RAM).

*Краткие сведения о математическом алгоритме*

Пусть  $\vec{d} = (d_1, \dots, d_N)^T$  – вектор значений аномального магнитного поля, а  $\vec{k} = (k_1, \dots, k_N)^T$  – магнитная восприимчивость пород, тогда можно считать, что они связаны через матрицу чувствительности  $\mathbf{G}$ :

$$\vec{d} = \mathbf{G}\vec{k} \quad (2)$$

Элементы этой матрицы определяют вклад всех ячеек модели в каждую точку данных. Матрица используется для инверсии на каждой итерации при решении прямой задачи. В MAG3D большой размер этой матрицы ( $N \cdot M$ ) можно уменьшить при помощи вейвлет-преобразования.

Целевая функция принята следующей:

$$\begin{aligned} \varphi_m(m) = & \alpha_s \int_V w_s \{w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]\}^2 dv + \alpha_x \int_V w_x \left\{ \frac{\partial w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]}{\partial x} \right\}^2 dv \\ & + \alpha_y \int_V w_y \left\{ \frac{\partial w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]}{\partial y} \right\}^2 dv + \alpha_z \int_V w_z \left\{ \frac{\partial w(\vec{r})[m(\vec{r}) - m_0]}{\partial z} \right\}^2 dv \end{aligned} \quad (3)$$

Функции  $w_s, w_x, w_y, w_z$  зависят от пространственных координат,  $\alpha_s, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  – постоянные, регулирующие вклад каждой компоненты.  $w(\vec{r})$  – обобщенная весовая функция глубины, служит для компенсации геометрического затухания чувствительности с глубиной, вызывающего концентрацию намагниченных тел вблизи точек наблюдения.

Целевая функция обладает большой гибкостью в подборе модели. Эталонной моделью  $m_0$  может являться полученная предварительными вычислениями или нулевой. Она будет включена в первое слагаемое целевой функции, но при желании может быть удалена из остальных компонент. Величина сходства полученной модели и эталонной контролируется функцией  $w_s$ , путем управления ее параметрами, можно увеличить ее вес в желаемом объеме пространства.  $w_x, w_y, w_z$  отвечают за скорость изменения магнитной восприимчивости в соответствующих направлениях.

Численное решение целевой функции методом конечных разностей выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\varphi_m(m) &= (m - m_0)^T (W_s^T W_s + W_x^T W_x + W_y^T W_y + W_z^T W_z) (m - m_0) \\ &\equiv (m - m_0)^T (W_m^T W_m) (m - m_0) = \|W_m(m - m_0)\|^2\end{aligned}\quad (4)$$

$m, m_0$  – векторы длины  $M$ , характеризующие модель.  $W_m$  формируется только один раз, после того, как заданы  $w_s, w_x, w_y, w_z, w(\vec{r})$  и сетка модели.

Несоответствие между посчитанной моделью и заданной выбрано следующим образом:

$$\varphi_d = \|W_d(\vec{G}k - d^{obs})\|^2, \quad (5)$$

где  $W_d$  – диагональная матрица с элементами, обратно пропорциональными среднеквадратическому отклонению в каждой точке измерений. Задача считается решенной при минимизации  $\varphi_m$  и  $\varphi_d$  с заданной точностью.

В использованной версии **MAG3D Ver.4.0** задача минимизации имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \text{минимизировать: } \varphi = \varphi_d + \mu\varphi_m \\ \text{при: } k_{min} \leq k \leq k_{max} \end{cases} \quad (6)$$



$k_{min}, k_{max}$  – векторы, содержащие верхний и нижний пределы значений модельных данных. Метод сопряженных градиентов оптимизирует логарифмическую барьерную функцию следующего вида:

$$\varphi = \varphi_d + \mu\varphi_m - 2\lambda \sum_{j=1}^M [\ln(k_j - k_j^{min}) + \ln(k_j^{max} - k_j)] \quad (7)$$

$\lambda$  – параметр барьера,  $\mu$  – параметр регуляризации. Логарифмический вид функции образует барьер вдоль допустимой области значений магнитной восприимчивости ( $k_{min} \leq k \leq k_{max}$ ).

В MAG3D параметр регуляризации можно выбрать вручную или рассчитать одним из способов, предложенных MAG3D.

Формат выходного файла поддерживается OasisMontaj.

При инверсии были выбраны следующие параметры.

#### ***6. Potent***

*Potent* позволяет совмещать гравитационные, магнитные данные, геологическую модель и их аномальное поля в интерактивном режиме. Программа предназначена для интерпретации гравитационных и магнитных данных методом подбора модели, которая больше всего соответствует той, которую построит пользователь. Поэтому результат ее вычислений очень сильно зависит от априорной геологической информации. MAG3D более продвинутая в этом отношении.

Процесс работы в программе приблизительно следующий: импортируются данные магнито- и гравиразведки, с помощью графического интерфейса создается геологическая модель в интерактивном режиме (из слоев, и тел различной формы), затем моделируется поле такой модели. Оставшаяся работа состоит в подборе модели таким образом, чтобы она соответствовала одновременно магнитным и гравитационным данным.

В работе применялся не весь функционал программы, она использовалась только для создания магнитной модели и сети наблюдений на разных высотах.

#### ***6. MeshTools***

Программа из комплекта UBC-Gif. Использовалась для быстрой оценки результатов инверсии. Рассчитана на работу только со специальными форматами файлов программ MAG3D, GRAV3D и DCIP3D. Для отображения данных необходим текстовый файл с расчётной сеткой. В функционал включена возможность моделирования плотностной или магнитной модели среды, изображение электромагнитных полей и их компонент, а также построение других наложенных данных в 3D формате.

#### ***2. ConvInv3D***

Утилита из пакета UBC-GIF. Разработана специально для быстрого получения grid-файла разреза. Принимает линию разреза, файл сетки и модель.

## Приложение Б. Дополнительные изображения

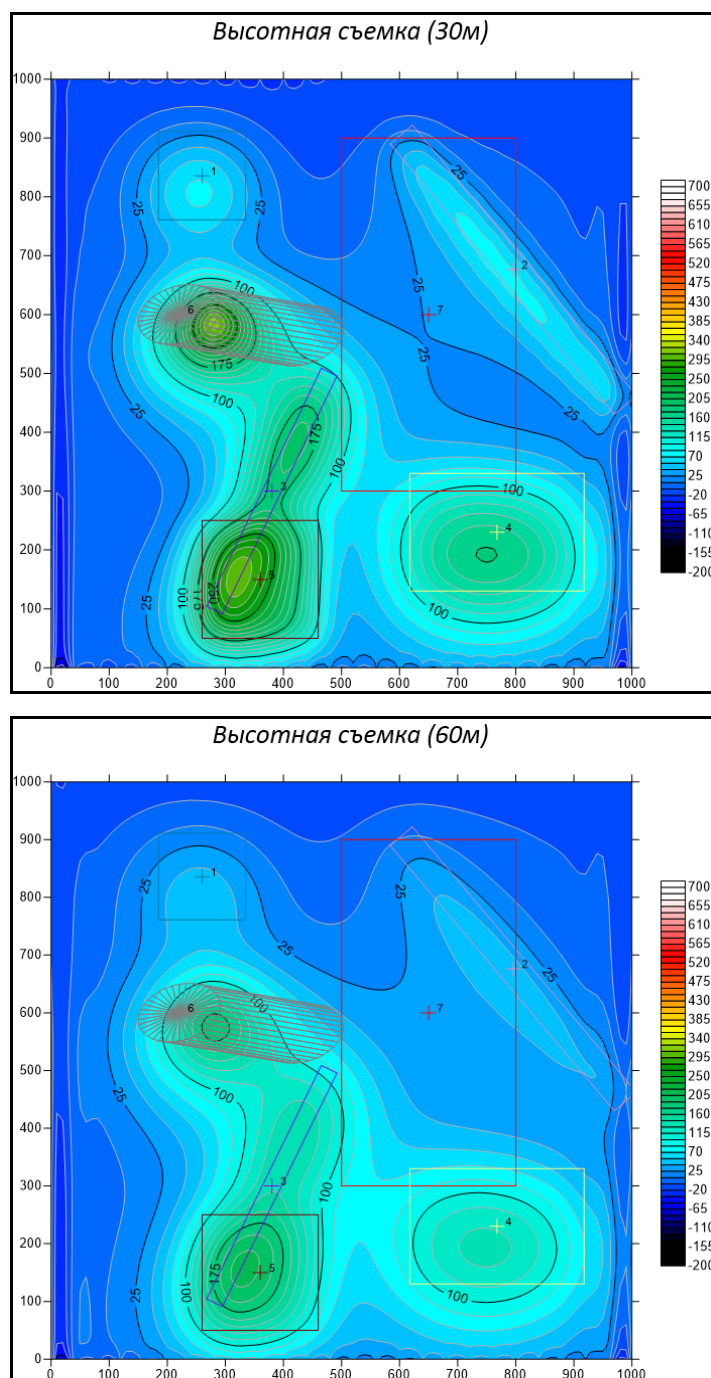


Рисунок 16. Аномальное поле при съемке с высоты 30 м и 60 м над первой моделью

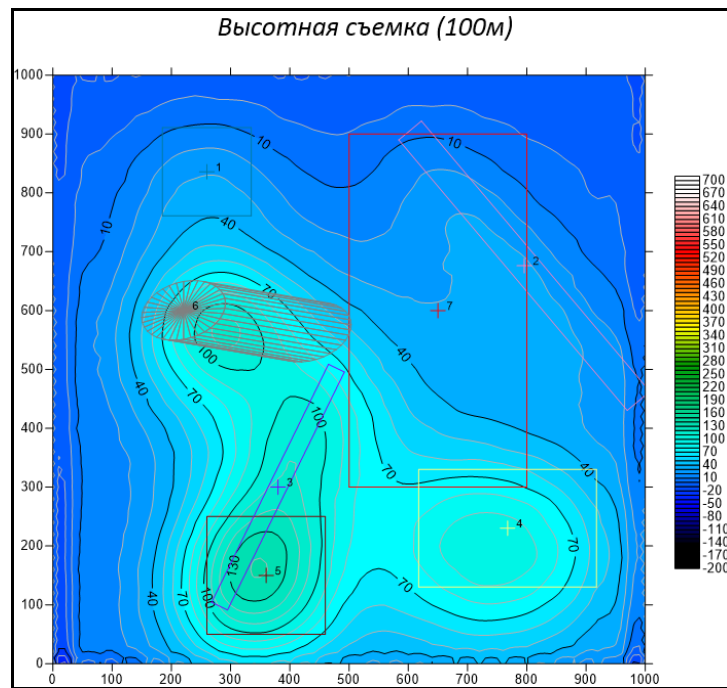


Рисунок 17. Аномальное поле при съемке с высоты 100 м над первой моделью

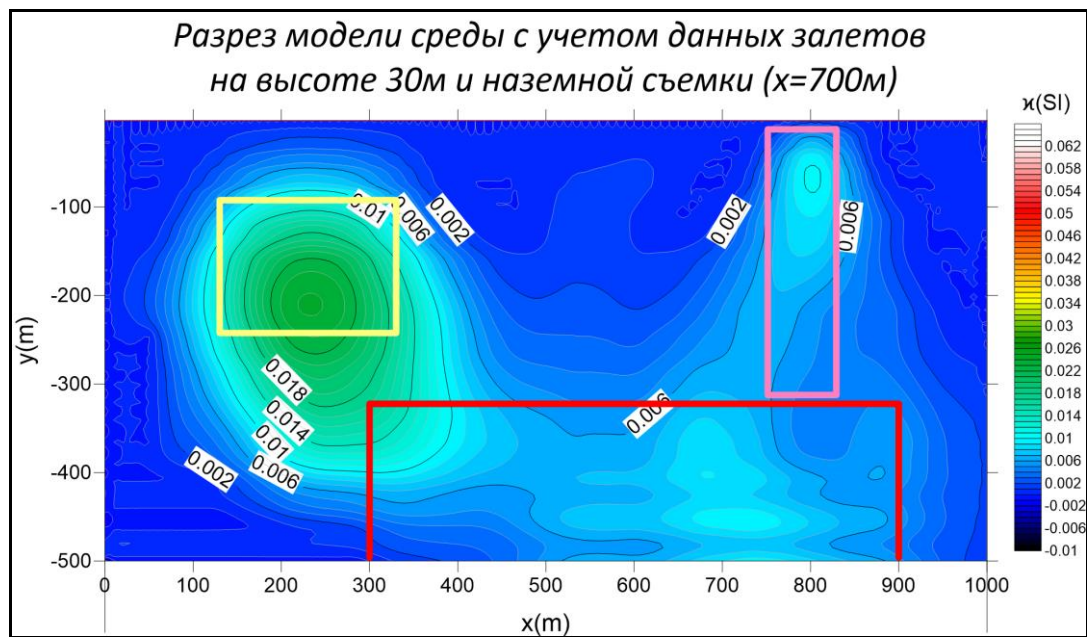


Рисунок 18. Разрезы магнитной восприимчивости после учета высот 2 и 30 м в инверсии. Разрез  $x=700$

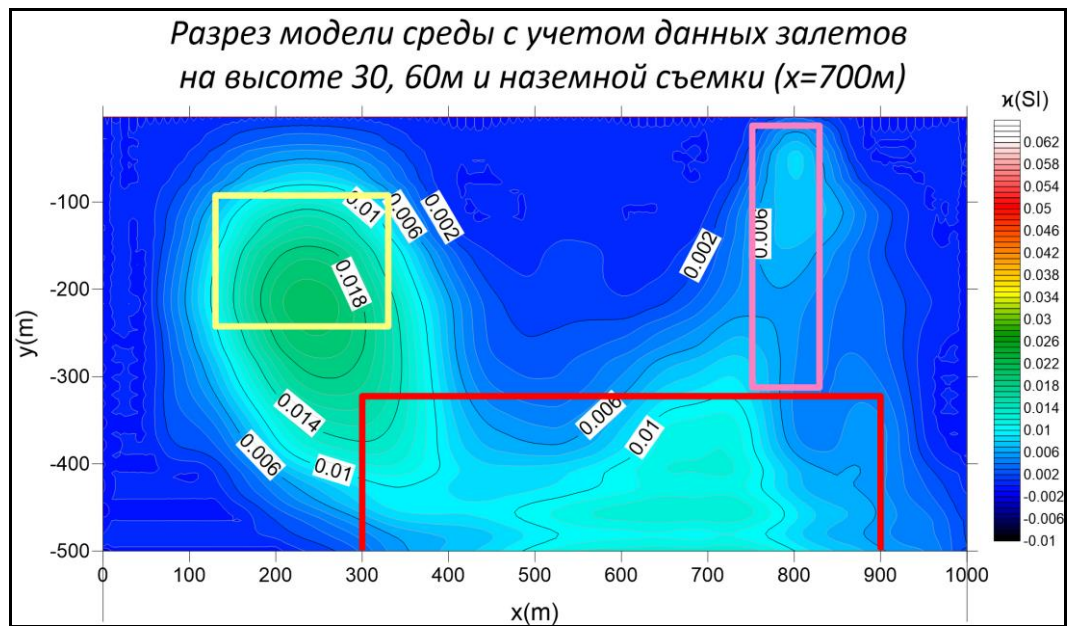


Рисунок 19. Разрезы магнитной восприимчивости после учета высот 2, 30, 60 м в инверсии. Разрез  $x=700$

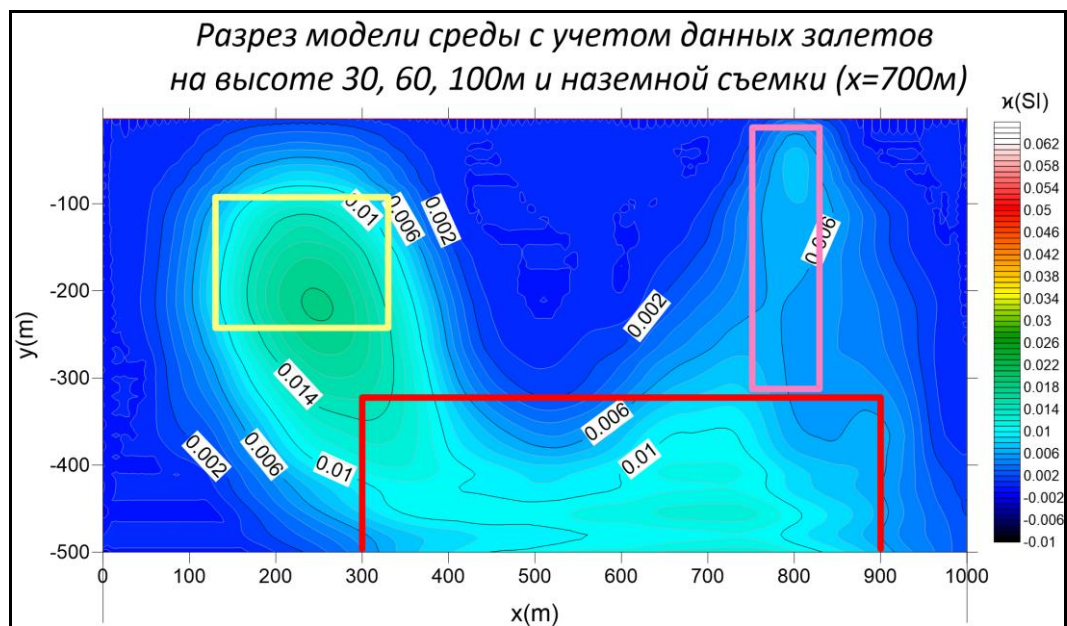


Рисунок 20. Разрезы магнитной восприимчивости после учета высот 2, 30, 60, 100 м в инверсии. Разрез  $x=700$



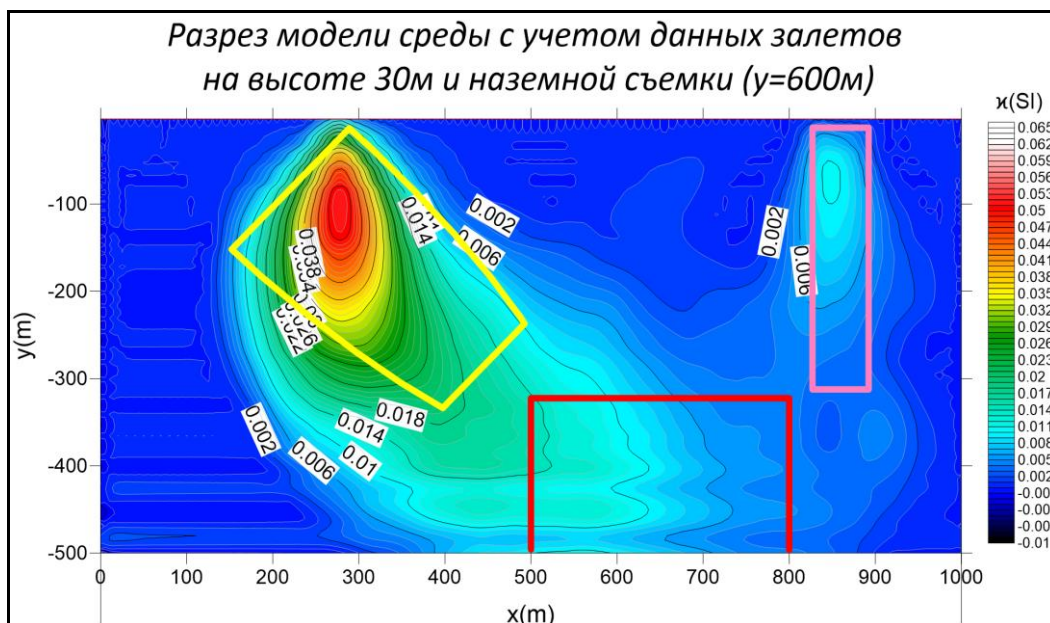


Рисунок 21. Разрезы магнитной восприимчивости после учета высот  
2 и 30 м в инверсии. Разрез  $y=600$

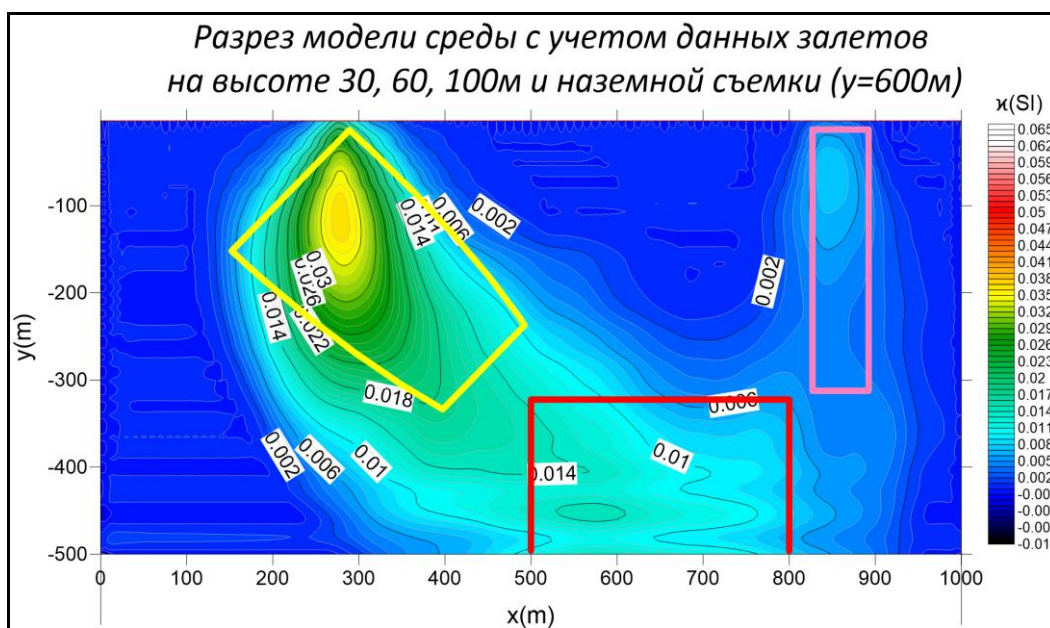


Рисунок 22. Разрезы магнитной восприимчивости после учета высот  
2, 30, 60, 100 м в инверсии. Разрез  $y=600$

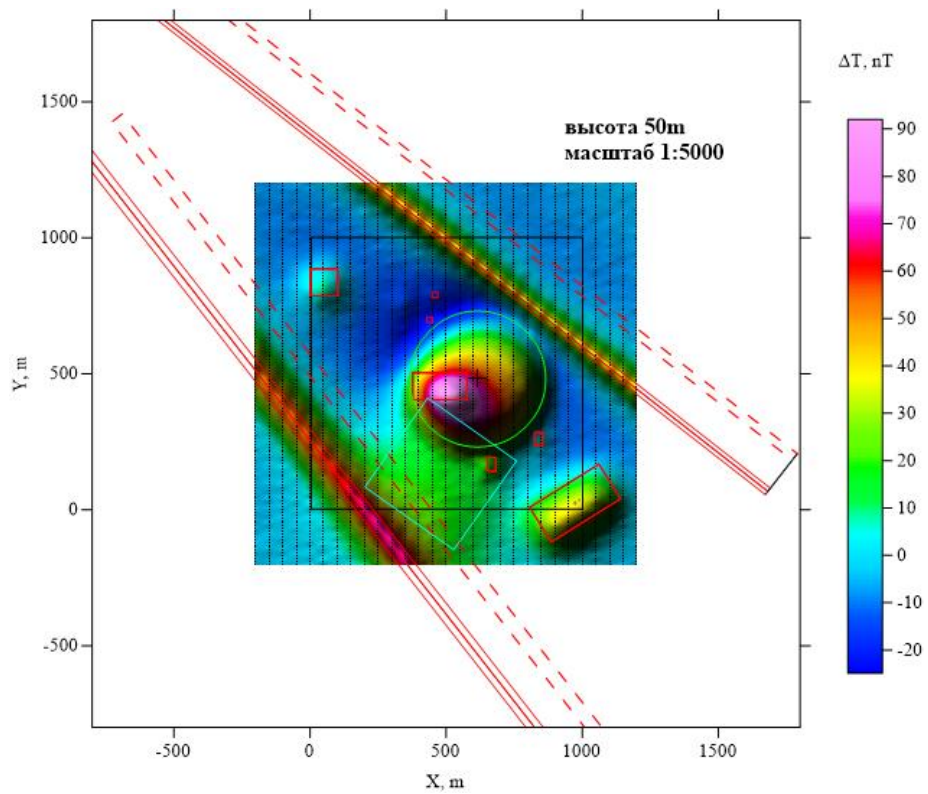


Рисунок 23. Карта аномального поля над второй моделью на высоте  
50 м

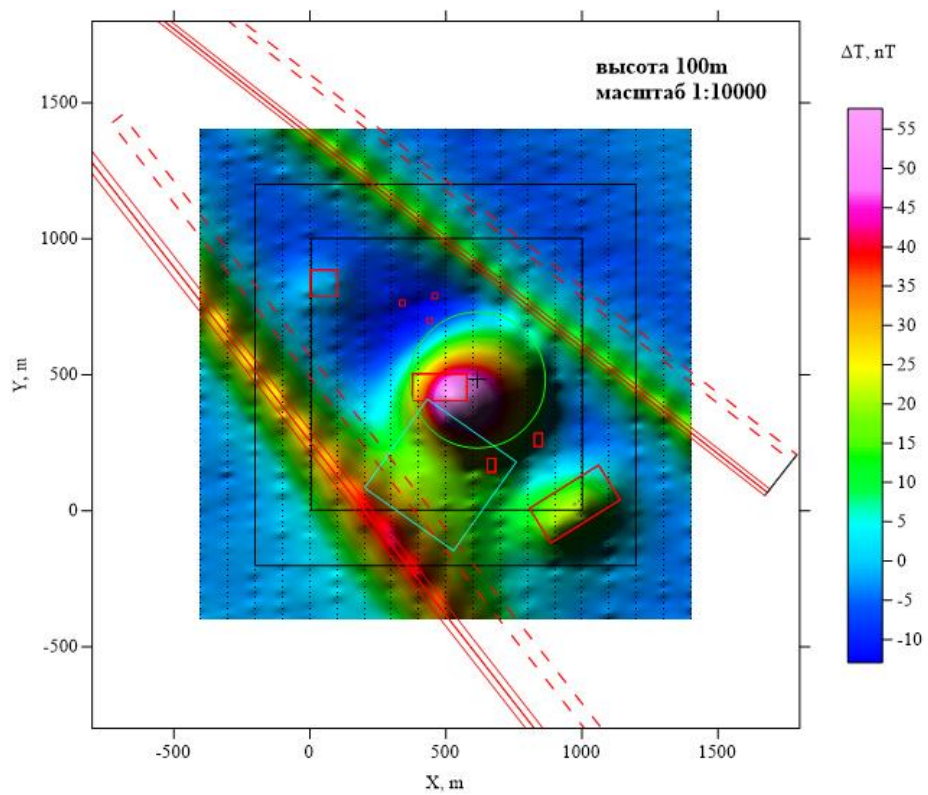


Рисунок 24. Карта аномального поля над второй моделью на высоте  
100 м

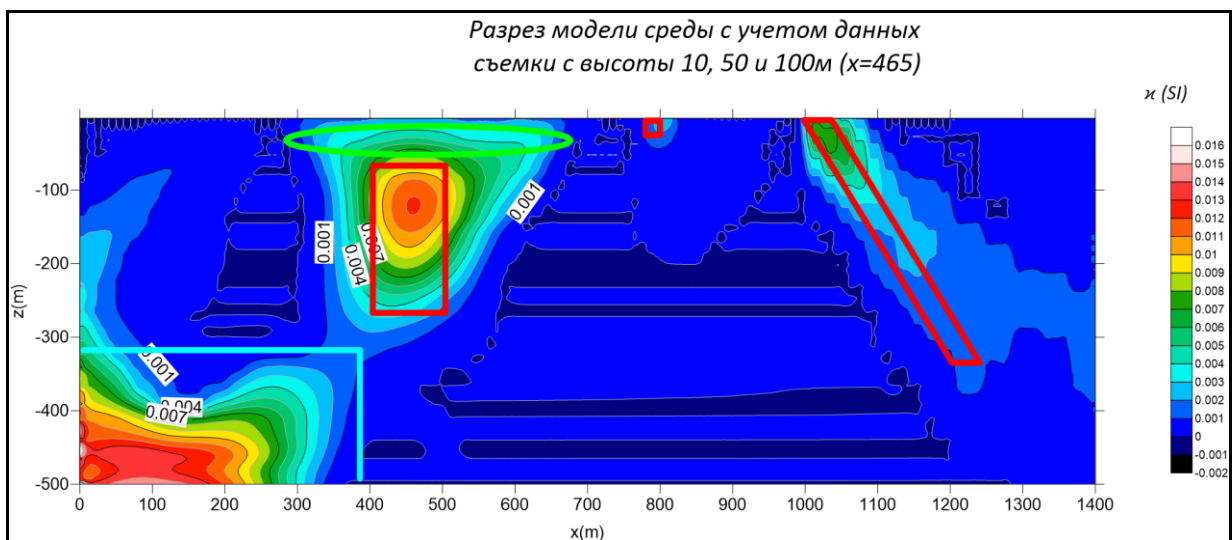
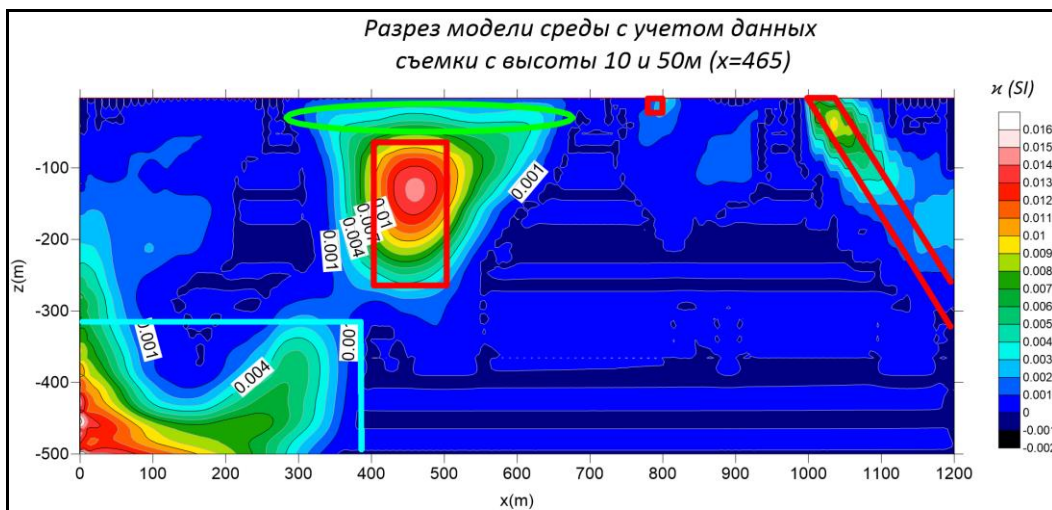
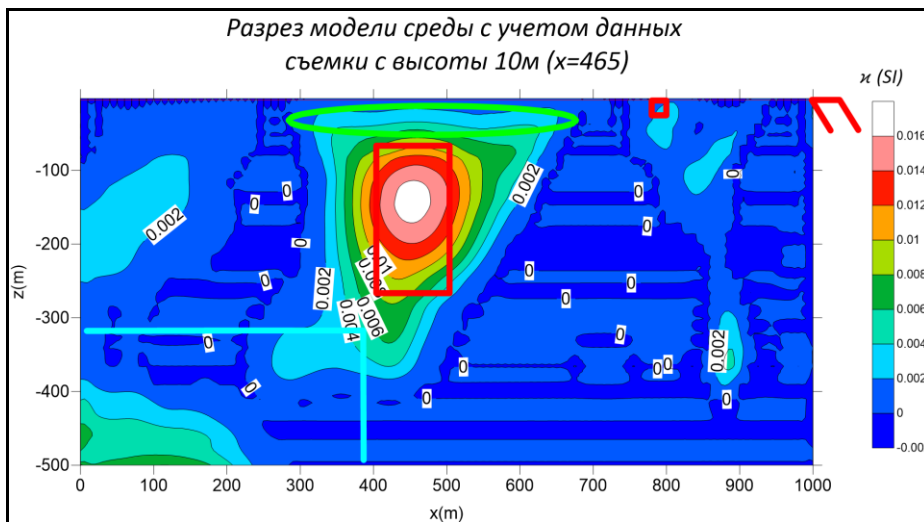


Рисунок 25. Разрезы магнитной восприимчивости для второй модели  
по профилю  $x=465$



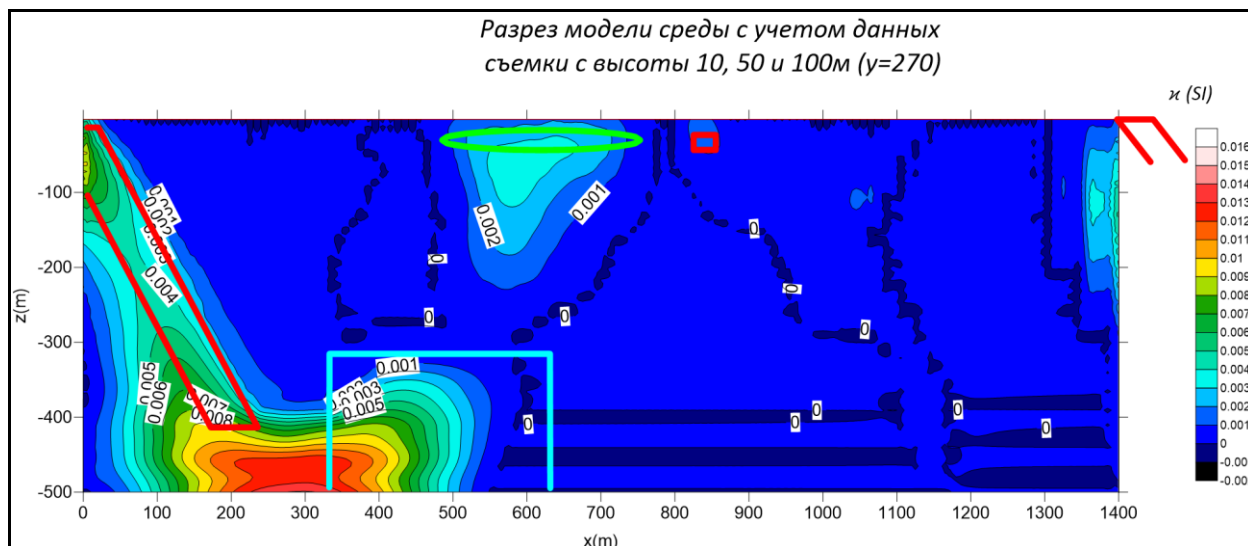
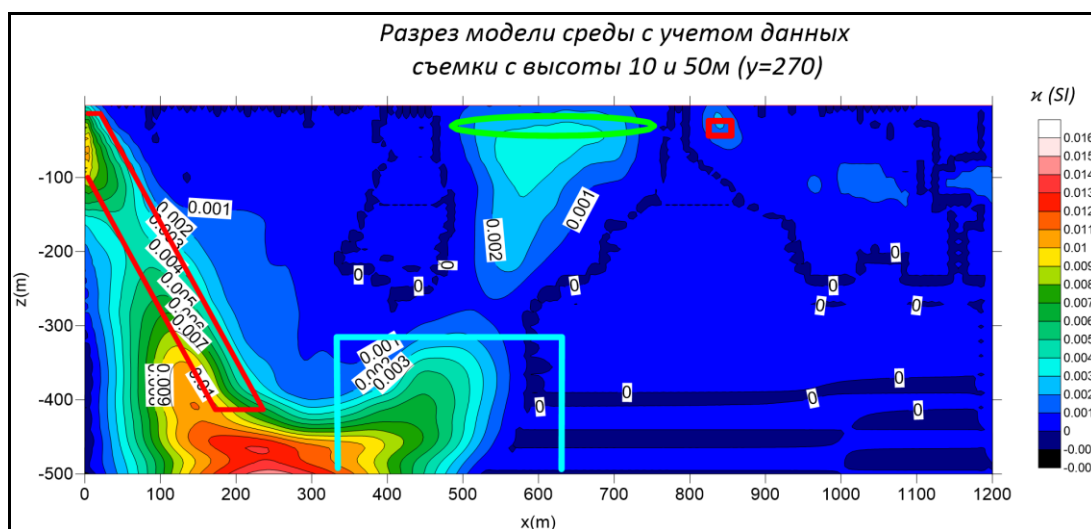
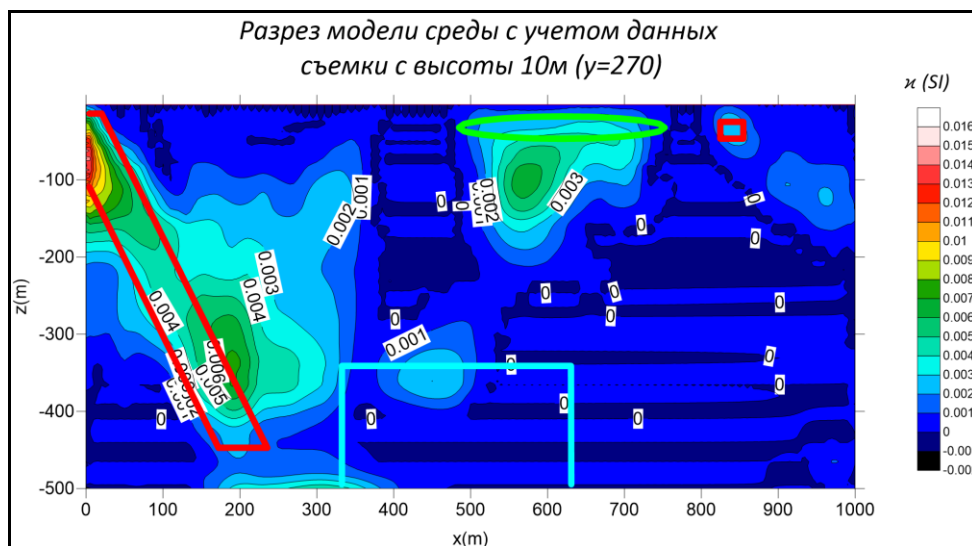


Рисунок 26. Разрезы магнитной восприимчивости для второй модели по профилю  $y=270$